

論文 PC 造ト形柱梁接合部の応力伝達機構に関する解析的研究

山田 泰之*1・大塚 夕*2・福井 剛*3・浜原 正行*4

要旨: 本研究では、PC 造ト形柱梁接合部に対して、PC 鋼材定着長さおよび接合部内帯筋比を要因とした弾塑性有限要素解析を行った。その結果、定着位置が接合部背面に近づくほど、帯筋が接合部最大耐力に与える影響が小さくなる傾向がみられた。最小主応力は、PC 鋼材定着板より接合部背面の領域で、ほぼ 45 度方向に分布していた。また、接合部内各応力は、柱内側フェイスから PC 鋼材定着板までの距離が 125mm、帯筋比 0% の試験体では、接合部背面に近づくに伴い、減少がみられた。この現象は、接合部背面の PC 鋼材定着板による締め付けと帯筋の引張力による影響であると考えられる。

キーワード: プレストレストコンクリート, ト形柱梁接合部, 有限要素法, PC 鋼材定着長さ, 帯筋比

1. はじめに

PC 造柱梁接合部 (以後、接合部) は、2009 年に PC 造技術基準¹⁾が発行されたことにより設計可能となった。この設計式は、接合部の終局強度が接合部平均せん断力によって支配されるとした仮説を基に提案されている。

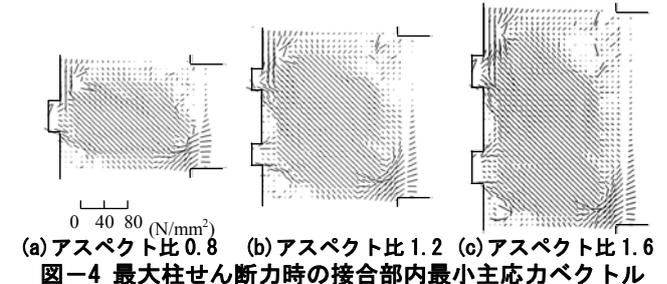
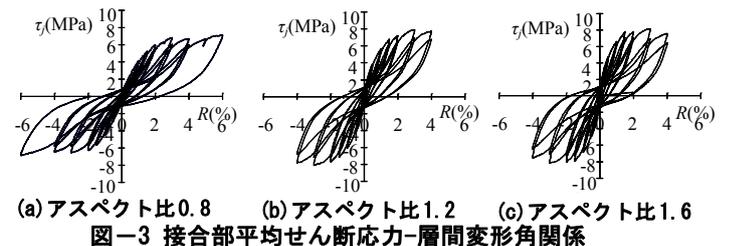
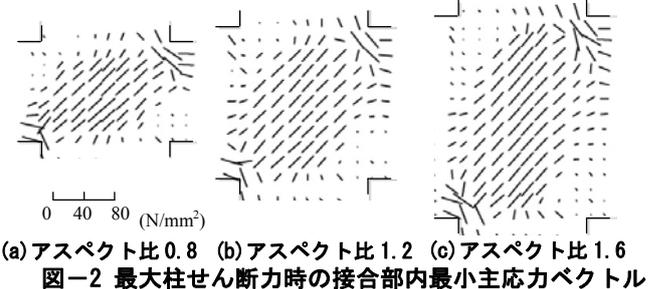
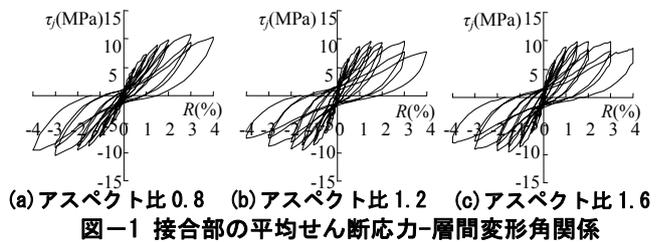
原井²⁾らは PC 造十字形接合部に対し、接合部アスペクト比を要因とした正負繰り返し載荷実験と有限要素解析を行った。これらの結果から以下のことを示した。

- 1) 接合部平均せん断応力の最大値は、**図-1**に示すようにアスペクト比に依存せず、ほぼ一定値を示していた。
- 2) 接合部内の最小主応力は、**図-2**に示すように、アスペクト比によらず、接合部内の広範囲にわたって、ほぼ 45 度方向で分布していた。

原井らは、これらの結果から、十字形接合部にトラス機構が形成されていると考え、これを基に、十字形接合部のせん断抵抗機構に関するマクロモデルと、その応力伝達機構に基づいた最大層せん断力の推定式を提案した。

小池らは、PC 造ト形接合部に対して、接合部アスペクト比を要因とした実験³⁾と解析⁴⁾を行った。**図-3**、**図-4**に示すように、ト形接合部でも、接合部平均せん断応力と最小主応力分布がアスペクト比に依存していないという実験と解析結果が得られた、これらの結果から、トラス機構が形成されている可能性を示した。しかし、ト形部分架構は十字形とは異なり、接合部背面に梁が存在しないため、この部位の最小主応力はゼロとなっている。ト形接合部にトラス機構が形成されている要因として、接合部内の帯筋に生じる引張力による影響が考えられる。さらに、ト形接合部は、接合部内に PC 鋼材定着板が内蔵されることがあるため、接合部内の応力状態は十字形とは異なる。したがって、十字形接合部のマクロモデルを適用することができない。

本研究では、PC 造ト形接合部に対して、PC 鋼材定着長さ (以後、定着長さ) および接合部内帯筋比を要因とした有限要素解析を行い、接合部内の応力状態について検討を行う。



*1 NTT ファシリティーズ中央 構造設計部 (正会員)

*2 株式会社ピーエス三菱 東京建築支店 建築設計部 PC 設計グループ (正会員)

*3 日本大学 理工学部海洋建築工学科准教授 (正会員)

*4 日本大学 理工学部海洋建築工学科教授 (正会員)

2. PC 造ト形部分架構の有限要素解析

PC 造ト形接合部は、PC 鋼材の定着位置が接合部背面に近づくほど接合部強度が増加することが指摘されている^{5),6),7)}。そこで本節では、文献7)の試験体と、この試験体を基準とした、PC 鋼材定着長さおよび接合部内帯筋比を要因とした PC 造ト形部分架構に対して、弾塑性有限要素解析を行い、接合部耐力と接合部内応力に及ぼす影響を検討する。

2.1. 文献7)の実験試験体に対する有限要素解析

2.1.1 解析概要

図-5 に PC 造ト形部分架構解析モデルの要素分割を示す。図-6 に梁断面、柱断面、定着板寸法、表-1 に解析モデル諸元、図-7 に接合部内の各鋼材位置を示す。

解析には汎用構造解析プログラム DIANA 中の有限要素法 2 次元弾塑性解析ソフトを用いた。解析モデルの諸元および鋼材の位置と断面積および有効緊張力は、解析の対象とした試験体に倣った。支点、載荷点には厚さ 30mm、ヤング係数 205kN/mm²の支圧板を設置し、応力の集中を緩和した。コンクリートは 4 節点アイソパラメトリック平面応力要素とし、圧縮の降伏条件には Drucker-Prager の降伏基準、引張りひ割れの判定には Tension cut-off 基準を用いた。主筋や PC 鋼材はトラス要素とし、降伏点と引張強度を特異点とする Tri-Linear モデルを採用した。プレストレスの導入は、付着要素の剛性をゼロとして所定の応力を PC 鋼材に与えた後に、PC 鋼材と定着板を結合させ、付着要素に初期剛性を与えた状態で応力を開放することによって梁にプレストレスを与えている。コンクリートおよび鋼材に関する具体的な諸元は表-2 に示すとおりである。

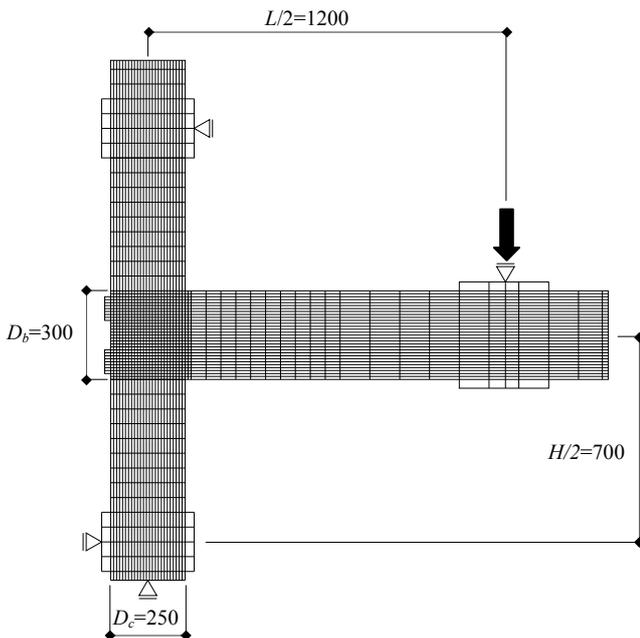


図-5 PC 造ト形部分架構解析モデル要素分割 (mm)

2.1.2 柱せん断力

図-8 は、柱せん断力 V_c —層間変形角 R 関係の解析値と実験値を示したものである。また、表-3 に最大柱せん断力の解析値と実験値を示す。この図と表より以下のことが指摘できる。

1) 最大柱せん断力の解析値は、定着長さ 192.5mm では 78.4kN、125mm では 66.7kN となっている。この結果は、定着位置が接合部背面に近づくにしたがい、接合部耐力が増加するという実験結果によく対応している。

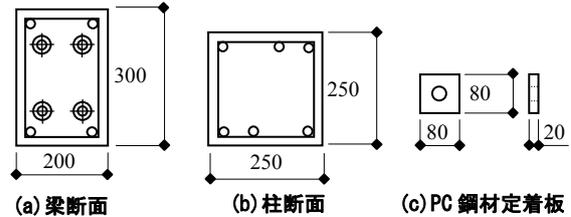


図-6 部材断面図 (mm)

表-1 解析モデル諸元

試験体名	ρ_p	D_b	b_j	D_c	H	L	p_w
TPCa1	192.5	300	225	250	1400	2400	0.34
TPCa2	125						

【記号】 ρ_p : 柱内側フェイス位置からの PC 鋼材定着長さ(mm),
 D_b : 梁の全せい(mm), b_j : 接合部有効幅(mm),
 D_c : 柱の全せい(mm), H : 階高(mm), L : スパン(mm),
 p_w : 接合部内帯筋比(%)

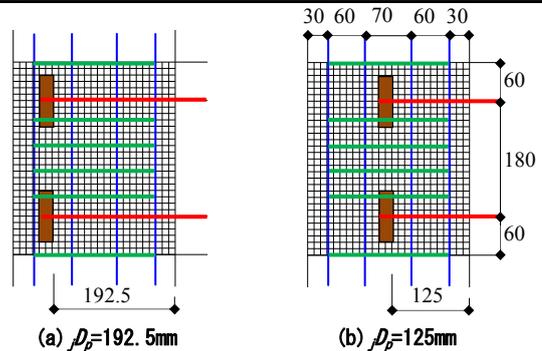


図-7 解析モデル各鋼材位置 (mm)

表-2 材料諸元

(a) コンクリート

σ_B	ϵ_m	σ_T	E_c	$\nu \cdot \sigma_B$
35.5	2033	2.85	32.9	18.6

【記号】 σ_B : 圧縮強度(N/mm²), ϵ_m : 圧縮強度時ひずみ(μ),
 σ_T : 引張強度(N/mm²), E_c : ヤング係数(kN/mm²),
 ν : 圧縮強度低減係数=0.7-($\sigma_B/200$)

(b) 鋼材

	D6	D10	D16	$\phi 23^*$
材種	SD295	SD295	KSS785	B種1号
用途	せん断補強筋	梁主筋	柱主筋	緊張材
σ_y	568	350	1003	1056
σ_T	713	496	1169	1119
E_c	211	184	202	200

【記号】 σ_y : 降伏強度(N/mm²), σ_T : 引張強度(N/mm²),
 E_c : ヤング係数(kN/mm²)

2) 最大柱せん断力の解析値と実験値を比較すると、定着長さ 192.5mm では 0.96、定着長さ 125mm では 0.98 となっており、これらの結果から、解析精度は比較的良好であることが確認できる。

3) 本解析でのせん断余裕度は、定着長さ 192.5mm では 0.40、定着長さ 125mm では 0.34 となっている。これらの結果から、本解析モデルは、文献 7) で行った実験と同様に、柱梁の曲げ破壊に接合部せん断破壊が先行していることが指摘できる。

2.1.3 接合部内最小主応力ベクトル

図-9 は、最大柱せん断力時の接合部内最小主応力ベクトル図を示したものである。この図より以下のことが指摘できる。

- 1) PC 鋼材定着板より内側の領域では、引張側の定着板から梁の圧縮側に向けてほぼ 45 度方向で最小主応力が分布している。
- 2) PC 鋼材定着板より接合部背面においても、ほぼ 45 度方向の応力分布がみられる。

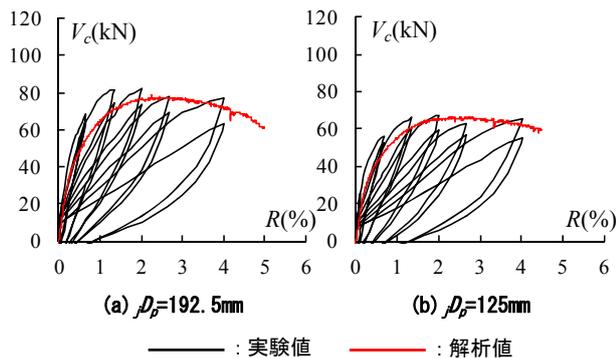


図-8 柱せん断力-層間変形角関係

表-3 最大柱せん断力の解析値および実験値

定着長さ	V_c (解析値)	V_c (実験値)	解析値 / 実験値	V_{cM}	解析値 / V_{cM}
192.5mm	78.4	81.9	0.96	198.4	0.40
125mm	66.7	67.6	0.98		0.34

【記号】 V_c : 柱せん断力(kN),

V_{cM} : 梁曲げ破壊時の柱せん断力(kN)

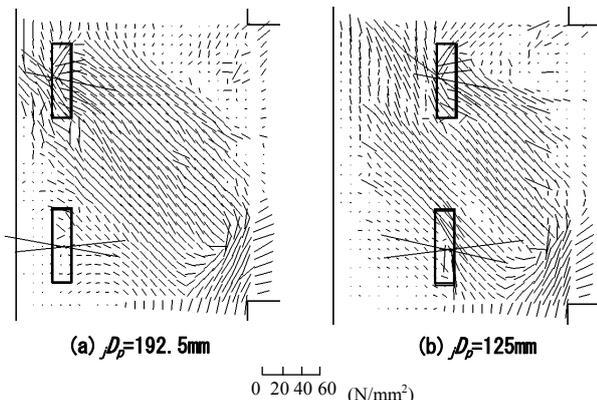


図-9 最大柱せん断力時の接合部内最小主応力ベクトル

原井ら⁴⁾が提案した十字形接合部のマクロモデルは、左右の梁からの締め付けによって 45 度方向のトラス機構を構成している。2)に示すような応力が生じるためには、定着板背面位置にせん断力が作用していなければならない。接合部背面に作用するせん断力のひとつとして、接合部内帯筋の引張力による影響が考えられる。

2.1.4 接合部内最小主応力コンター

図-10 は、最大柱せん断力時の接合部内最小主応力コンター図を示したものである。この図より以下のことが指摘できる。

- 1) 最小主応力は、PC 鋼材定着板より内側では、引張側の PC 鋼材定着板から、柱内側と梁の下端に向けて対角線方向に集中している。
- 2) 引張側の PC 鋼材定着板より接合部背面位置においても、圧縮主応力がみられる。また、定着長さ 125mm 試験体では、圧縮側定着板の背面位置で応力が見られる。これに対して、定着長さ 192.5mm 試験体では、圧縮側定着板の背面位置の応力はほぼゼロとなっている。

2.2 PC 鋼材定着長さおよび接合部内帯筋比を要因とした有限要素解析

2.1 節で示した解析結果から、PC 鋼材の定着長さや接合部内帯筋が、接合部の応力状態に影響を及ぼすことが確認できた。そこで本節では、前節で示した解析モデルに対して、PC 鋼材定着長さや接合部内帯筋比を要因としたパラメトリックスタディを行う。

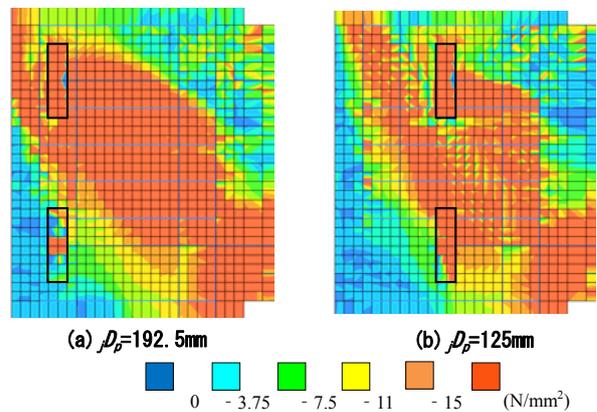


図-10 最大柱せん断力時の接合部内最小主応力コンター

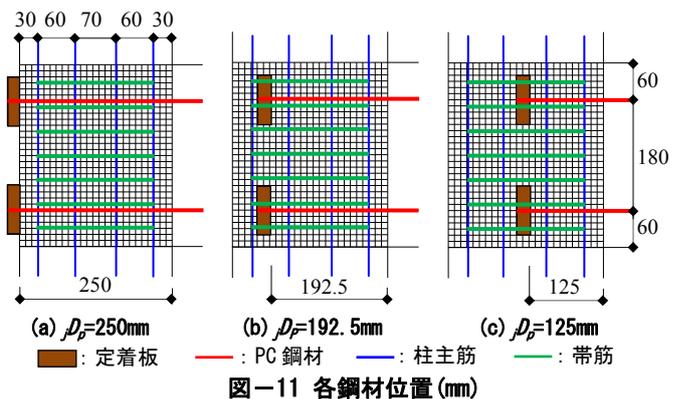


図-11 各鋼材位置(mm)

2.2.1 解析概要

図-11に解析モデルの定着板および各鋼材位置、表-4に解析モデルの諸元を示す。解析モデルの要素分割、寸法、材料諸元および解析手法は、2.1節で示した解析と同様とした。解析は、PC鋼材定着長さを、外定着とした $jD_p=250\text{mm}$ 、内定着とした $jD_p=192.5\text{mm}$ 、 $jD_p=125\text{mm}$ の3水準、接合部内帯筋比を0.6%、0.4%、0.2%、0.1%、0%とした5水準の、計15体の試験体に対して行う。いずれの試験体も、柱・梁の曲げ破壊に接合部破壊が先行するように設計しており、せん断余裕度は0.21~0.42となっている。接合部内帯筋比は、帯筋位置をすべての試験体で同一とし、鋼材断面積を変化させることによって指定している。

2.2.2 柱せん断力

図-12は、最大柱せん断力の解析値と実験値を示したものである。また、図-13に帯筋比0.6%、0.2%、0%の柱せん断力と層間変形角関係、表-5に最大柱せん断力の解析値を示す。この図と表より以下のことが指摘できる。

- 1) 定着長さが長くなるにしたがい、最大柱せん断力の解析値が大きくなる傾向がみられる。
- 2) 定着長さ125mm試験体の解析値は、帯筋比0%では59.7kN、0.6%では73.9kNであり、両者を比較してみると、帯筋比0%試験体が帯筋比0.6%試験体より、接合部耐力が約24%減少している。また、定着長さ192.5mmと250mm試験体に対して同様に比較すると、192.5mmは約

表-4 解析モデル諸元

p_w	0.6	0.4	0.2	0.1	0
α_w	64.286	42.857	21.429	10.114	0

【共通因子】 $D_b=300$, $D_c=250$, $H=1400$, $L=2400$

【記号】 p_w : 接合部内帯筋比(%), α_w : 帯筋断面積(mm²),

D_b : 梁の全せい(mm), D_c : 柱の全せい(mm),

H : 階高(mm), L : スパン(mm)

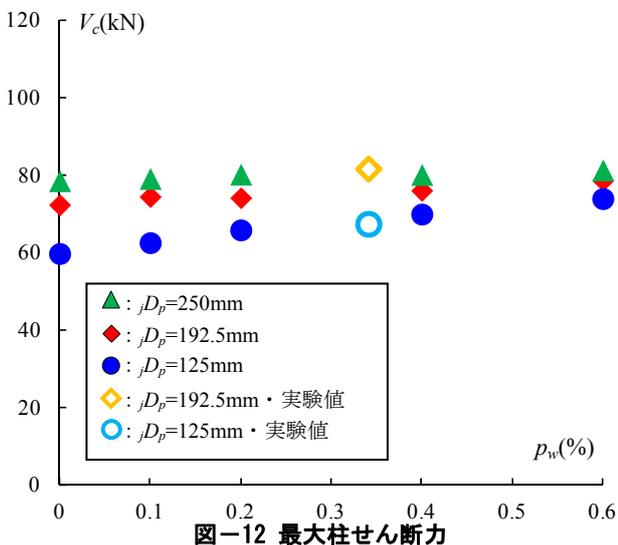


図-12 最大柱せん断力

8%、250mmは約4%の耐力の減少がみられる。以上の結果から、定着長さが長くなるほど、接合部内帯筋が接合部最大耐力に及ぼす影響が小さくなる事が分かる。

3) すべての試験体において解析値は、梁曲げ破壊時の柱せん断力を下回っている。この結果から、梁曲げ破壊に接合部破壊が先行していることが確認できる。

以上のことから、定着位置が接合部梁側に近づくにしたがい、接合部最大耐力が減少する結果が得られた。この傾向は、文献5)~7)の実験と同様の結果であった。また、定着長さが長くなるにしたがって、帯筋が接合部最大耐力に及ぼす影響は小さくなる。

2.2.3 接合部最小主応力ベクトル

図-14は帯筋比0.6%、0%試験体の最大柱せん断力の最小主応力ベクトル図を示したものである。これより以下のことが指摘できる。

- 1) PC鋼材定着板より内側の領域において、引張側の定着板から梁の圧縮側に向けてほぼ45度方向で応力が分布している。この現象は、定着長さ125mmの試験体ではみられない。
- 2) 定着長さ192.5mm、125mmの試験体では、帯筋比の減少に伴って、圧縮ストラット幅が小さくなる傾向がみられる。これに対して、定着長さ250mmの試験体では、この傾向は確認できない。

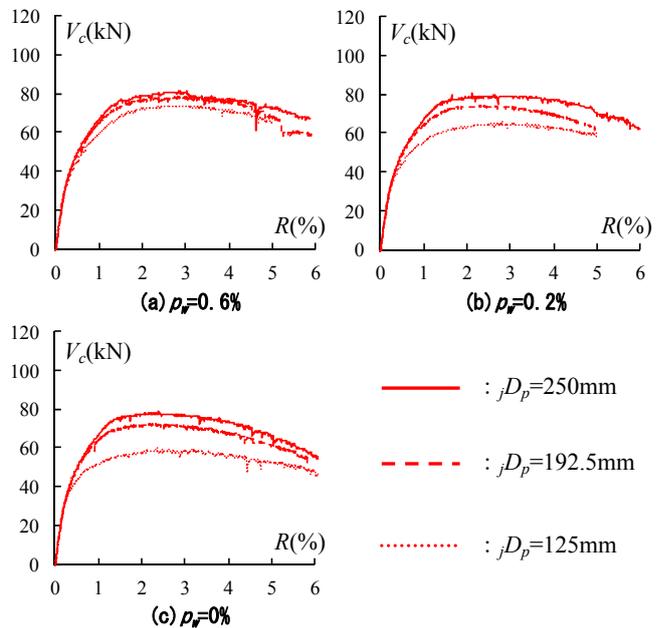


図-13 柱せん断力-層間変形角関係

表-5 最大柱せん断力の解析値

jD_p	p_w	解析値					V_{CM}
		0	0.1	0.2	0.4	0.6	
250		78.5	79.1	80.2	80.1	81.3	198.4
192.5		72.3	74.4	74.1	76.0	78.6	
125		59.7	62.5	65.8	70.1	73.9	

【記号】 p_w : 接合部内帯筋比(%), jD_p : PC鋼材定着長さ(mm)

V_{CM} : 梁曲げ破壊時の柱せん断力(kN)

3) 定着長さ 192.5mm, 125mm の試験体では, PC 鋼材定着板より接合部背面位置においても, ほぼ 45 度方向の最小主応力が分布している。また, 応力の分布領域は, 引張側の PC 鋼材定着板背面位置では応力が生じているのに対し, 圧縮側の PC 鋼材定着板背面での応力は, ほぼゼロとなっている。

2.2.4 接合部最小主応力コンター

図-15 は帯筋比 0.6%, 0%試験体の最大柱せん断力時の最小主応力コンター図を示したものである。この図より次のことが指摘できる。

- 1) 最小主応力は, 引張側の PC 鋼材定着板から, 柱の内側と梁の下端 (図右下) に向けて, 接合部内の対角線方向に集中している。
- 2) 定着長さ 250mm, 192.5mm の帯筋比 0%の試験体では, 圧縮側の定着板から柱の内側と梁の下端 (図右下) に向けて応力がみられる。
- 3) 定着長さ 192.5mm, 125mm 試験体では, 定着板より接合部背面位置の領域において, 図中黒丸で示す接合部背面上部から対角線方向の応力集中領域が確認できる。

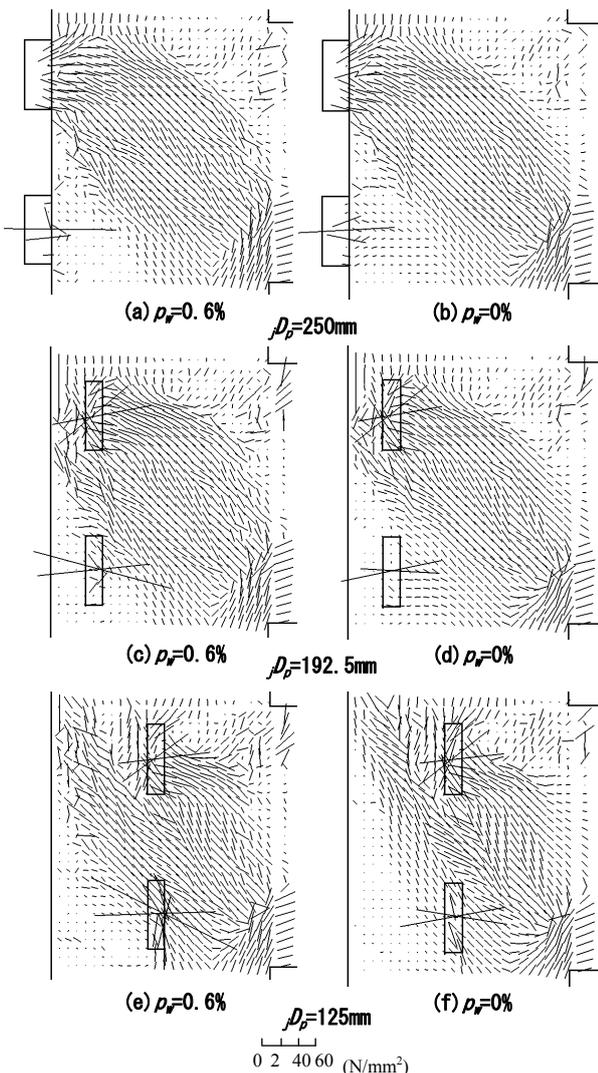


図-14 最大柱せん断力時の最小主応力ベクトル

4) 定着長さ 192.5mm, 125mm の帯筋比 0.6%試験体では, 図中黒丸で示す接合部背面上部から圧縮側定着板に向けて応力が集中している。これに対して, 帯筋比 0%の試験体では, 図中黒丸で示す接合部背面上部から圧縮側定着板に向かう応力の集中領域はみられない。

5) 高応力領域の幅は, 定着長さが短くなるにしたがって小さくなっている。この傾向は, 帯筋比が小さいほど顕著にみられる。

2.2.5 接合部内各応力

図-16 は最大柱せん断力時の, 帯筋比 0.6%, 0%試験体の最小主応力 σ_2 , 垂直応力 σ_x, σ_y およびせん断応力 τ_{xy} の分布を示したものである。x を横方向, y を縦方向, z を奥行きとして設定している。図-17 に各応力の検討位置を示す。

1) σ_2 は, 定着長さ 250mm 試験体では, 最外柱主筋間で主応力がほぼ一定値をとっている。定着長さ 192.5mm, 125mm 試験体では, 接合部背面側の柱主筋位置で応力の減少が確認できる。この現象は, 帯筋比が小さいほど顕著にみられる。

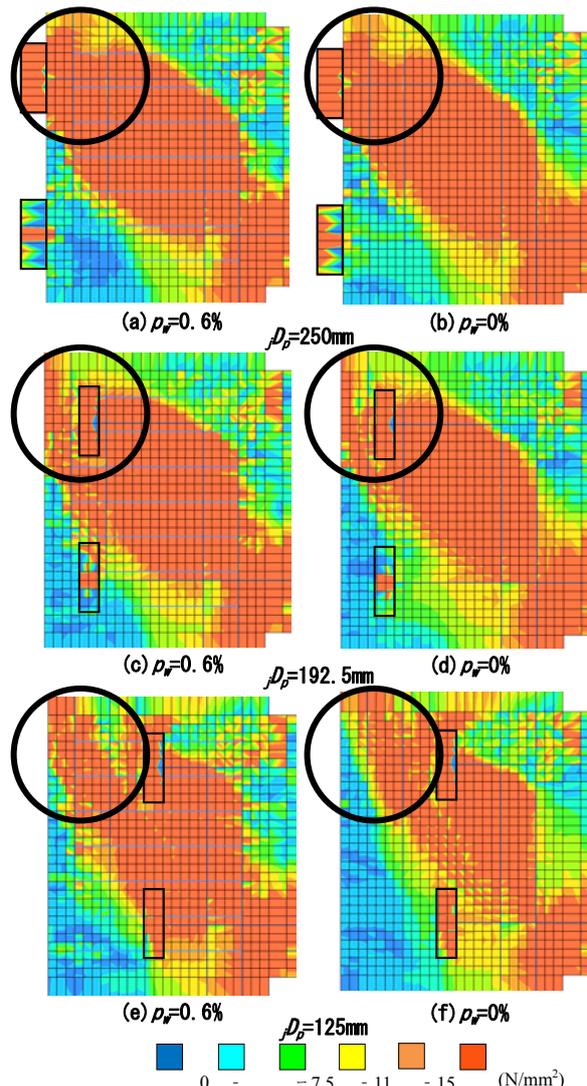


図-15 最大柱せん断力時の最小主応力コンター

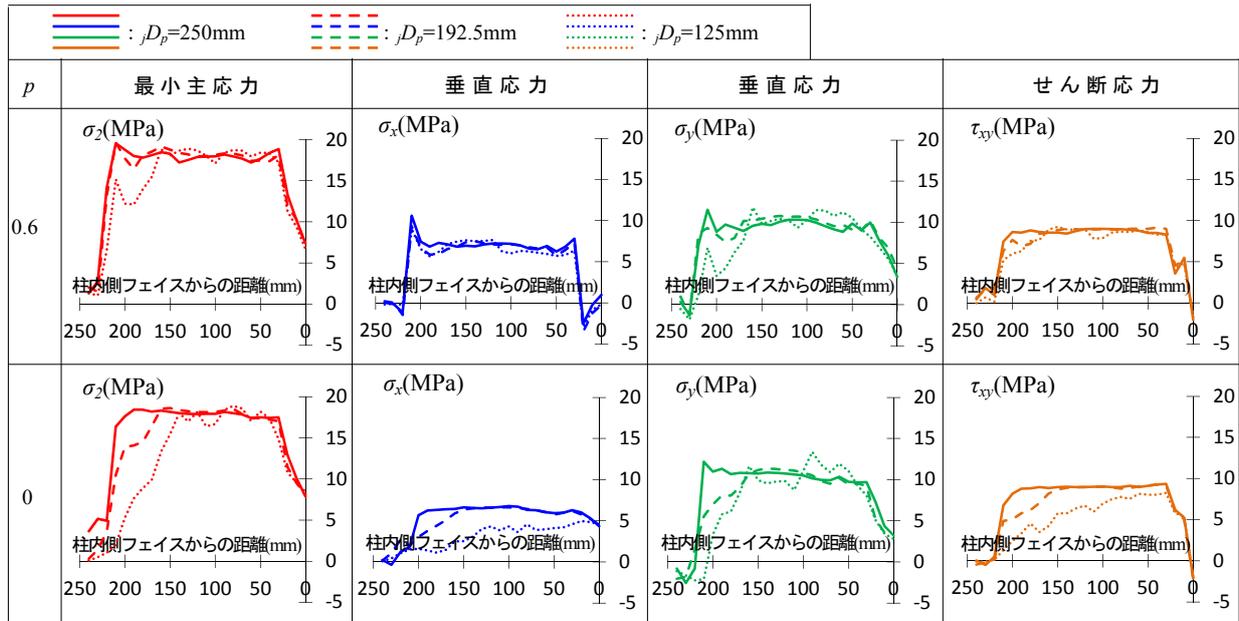


図-16 最大柱せん断力時の接合部中央水平位置における各応力

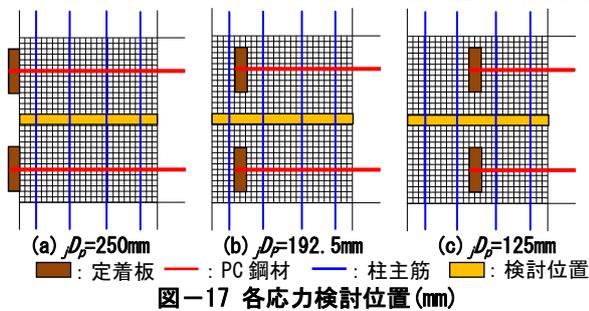


図-17 各応力検討位置 (mm)

2) 最外柱主筋間の σ_2 は、コンクリートの有効圧縮強度に達している。この結果は接合部が圧縮破壊していることを示している。

3) σ_x は、帯筋比 0.6% では最外柱主筋間で応力がほぼ一定値をとっており、柱主筋より外側の位置で応力が減少し、ゼロとなっている。これに対して帯筋比 0% では、接合部梁側において応力はゼロになっていない。

4) σ_y は、帯筋比による影響はみられず、応力が柱主筋間で一定値をとり、柱主筋より外側の位置で応力が急激に減少している。また、接合部背面側の応力はゼロとなっているのに対して、梁側では応力がみられる。

5) τ_{xy} は、定着長さ 250mm 試験体では、最外柱主筋間で応力がほぼ一定値をとっており、柱主筋より外側の位置で応力が急激に減少している。定着長さ 192.5mm, 125mm 試験体では、接合部梁側の最外柱主筋から接合部背面に向かうにしたがって、応力の減少がみられる。

6) すべての応力分布に現れている性状として、定着長さ 125mm 試験体の帯筋比 0% では、圧縮側の柱主筋から接合部背面位置に近づくに伴い、応力が減少する傾向がみられる。この現象は、接合部背面の PC 鋼材定着板による締め付けが存在しないためであると考えられる。また、帯筋比 0.6% ではその傾向がみられないことから、帯筋による締め付けも影響を与えていることが考えられる。

3. まとめ

PC 造ト形部分架構に対する弾塑性有限要素解析を行い以下のことを示した。

- 1) 文献 7) の試験体に対する解析では、定着位置が接合部背面に近づくにしたがって、接合部耐力が増加する傾向がみられた。この結果は実験結果によく対応していた。
- 2) 定着位置が接合部背面に近づくほど、帯筋が接合部最大耐力に与える影響が小さくなる傾向がみられた。
- 3) 最小主応力は、PC 鋼材定着板より接合部背面の領域において、ほぼ 45 度方向に分布しており、この傾向は、帯筋比が大きいほど顕著にみられた。
- 4) 定着長さ 125mm 試験体の帯筋比 0% では、圧縮側の柱主筋から、接合部背面位置に近づくにしたがって、応力の減少がみられた。この現象は、接合部背面の PC 鋼材定着板と接合部内帯筋による締め付けの有無によるものであると考えられる。

[参考文献]

- 1) 2009 年度版 PC 造技術基準解説及び設計・計算例, 2009
- 2) 原井直人ほか: PC 造梁・内側柱接合部の終局強度に及ぼす接合部アスペクト比の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75 No. 652, pp1129-1137, 2010
- 3) 小池正大ほか: 接合部アスペクト比が PC 造ト型部分架構の力学的挙動に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp 835-836, 2011
- 4) 小池正大ほか: PC 造ト型柱・梁接合部の応力伝達機構に関する有限要素解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp 885-886, 2013
- 5) 塩原等ほか: 梁にプレストレスを導入した鉄筋コンクリート外部柱梁接合部の接合部強度の実験 その2 実験結果の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp 1031-1032, 2000
- 6) 西山峰広ほか: PC 鋼材定着位置の梁柱接合部強度に及ぼす影響 その2 実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp 929-930, 2001
- 7) 藤田亮ほか: PCaPC 造柱・梁接合部の終局強度に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp 919-920, 2004