

論文

[2112] 鉄筋コンクリート内部梁・柱接合部のせん断耐力に関する
実験研究

正会員○石川裕次（東京大学大学院）

正会員 上村智彦（芝浦工業大工学部）

§ 1. 目的

現在、設計手法は終局強度設計法に移行しつつあり、柱・梁接合部の耐震設計の基本は、せん断破壊や過度の定着劣化を起こさせずに、部材端ヒンジのエネルギー吸収能力を確保・維持できるように保障することである。このためには、まず、接合部のせん断耐力を推定できることが必要である。しかしながら、対象とする平面骨組内部接合部のせん断破壊時の耐力評価に関する統一した知見が得られていない。この接合部耐力時の応力伝達機構の評価上、不明瞭な因子として、①繰り返しによる接合部コンクリートの劣化の程度、②柱中間筋の役割がある。

本研究の目的は、以上、過去に検討がほとんど行われていない、①、②について、実験によって、定性的検討をしようとするものである。

§ 2. 試験体

試験体は、①せん断抵抗機構の解明のためと、②設計では、保障変形に至るまで接合部破壊しないようにすることの理由から、梁曲げ降伏後接合部破壊する接合部せん断入力量が大きい場合を対象とした。試験体は3体(No1, No2, No3)であり、各試験体の形状寸法を図-1に示す。No1とNo2は同じ形状寸法で、

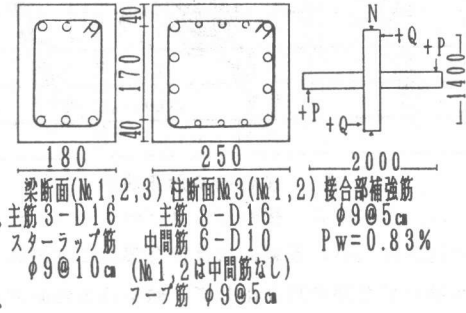


図-1 試験体寸法

No3はNo1に柱中間筋(柱付根から柱上下端方向へ40dの長さで定着)を配したものである。No1を基本とし、No2は繰り返し数の影響をみるために、最大耐力前に最大耐力の7割程度の荷重で5回、最大耐力後は、包絡線を確認した各時点の耐力の8割の荷重で各々4回繰り返し、No3は柱中間筋の影響を調べるためである。使用材料は、D16($\sigma_y=3808\text{kg/cm}^2, E_s=1.870 \times 10^6\text{kg/cm}^2$)、D10($\sigma_y=3775\text{kg/cm}^2, E_s=1.830 \times 10^6\text{kg/cm}^2$)、 $\phi 9$ ($\sigma_y=3307\text{kg/cm}^2, E_s=1.974 \times 10^6\text{kg/cm}^2$)であり、コンクリートは普通コンクリート $F_c=238\text{kg/cm}^2$ である。

加力は、図-1のように正負逆対称加力(梁端加力、柱頭及び、柱脚支点)とし、柱には、 $N=27t$ ($\sigma_B=43.2\text{kg/cm}^2$)の一定軸力を加えた。

§ 3. 測定方法

各変形(δ_R : 層間変位、 δ_C : 柱変形、 δ_B : 梁変形、 γ ($=\alpha-\beta$): 接合部変形)は、図-2に示すような柱頭、柱脚の支点のボルトに取り付けた十字型基準ゲージ・ホルダー(以下G.Hと呼ぶ)と、接合部内のボルトに取り付けた柱方向G.H、梁方向G.Hの独立した3組のG.Hを用いて、図に示すような変形との関係から測定した。

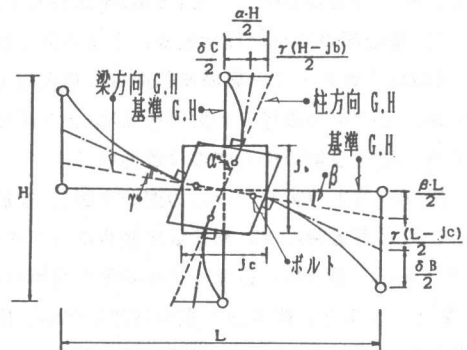


図-2 変形測定方法

鉄筋の歪測定は、接合部の近傍で重点的に行い、コンクリートの歪は、梁及び柱付根部分で測定した。

§ 4. 破壊状況

図-3に接合部破壊状況の例、図-4に層間変位曲線、図-5に接合部変形角曲線を各々示す。

3体とも、ほぼ同じ耐力(No.1 P=4.95t 層間部材角 R=0.022rad, No.2 P=5.15t R=0.020, No.3 P=5.20t R=0.021)で、梁曲げ主筋降伏後に、梁付根のコンクリートの圧潰現象をみることもなく(コンクリート歪測定からも確認)、接合部破壊した。最大耐力時には、接合部変形曲線と梁変形曲線で降伏現象が確認できた(表-1参照)。

No.1 最大変形時 P=+3.80t(8C)

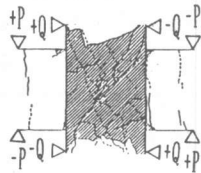


図-3 破壊状況

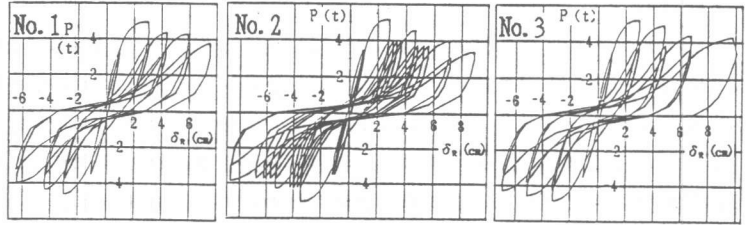


図-4 層間変位曲線

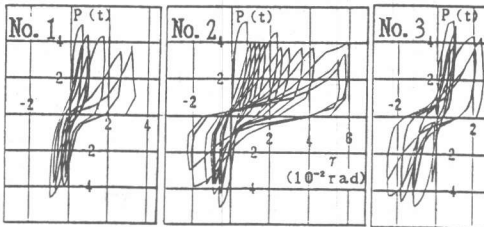


図-5 接合部変形角曲線

表-1 諸発生現象荷重 (P: 梁せん断力)

部材	諸発生現象	理論値(t)	実験値(t)		
			No.1	No.2	No.3
梁	曲げひび割れ	0.77*1	1.25	1.25	0.75
	せん断ひび割れ	3.75*2	3.75	3.25	3.25
	主筋降伏	4.39*3	4.25	4.00	4.25
柱	曲げひび割れ	2.49*1	2.50	2.25	2.25
	曲げ降伏耐力	9.82*3	—	—	—
接合部	せん断ひび割れ	2.41*4	2.25	2.25	2.25
	せん断終局耐力	5.08*5	4.95	5.15	5.20

最大耐力以後、接合部のカバーコンクリートの剝落は進み、最終的には接合部のひび割れは次第に接合部を飛び出して、傾斜角を鉛直方向へ転じさせながら柱主筋に沿って進展し、柱付根のコーナー部分のかぶりコンクリートがかなりの長さに渡って剝落した。

1. 繰り返し数の影響 No.1とNo.2を比較してみると、No.2において、

(1)最大耐力(最大耐力以前に最大耐力の7割程度で5回繰り返し)までの接合部斜めひび割れの発生状況及び、そのひび割れ幅の大きさには違いはみられず、最大耐力以降の繰り返し時に、接合部ひび割れ幅の拡大を生じ、接合部コンクリートが極端に粉状に細かくなる。

(2)最大耐力とその時の層間変位(R≒1/50)は同じであるが、最大耐力以降の耐力劣化が大きい。

2. 柱中間筋の影響 No.1とNo.3を比較してみると、No.3において、

(1)接合部のひび割れ状況は、主たる斜めひび割れの近傍に細かいひび割れが多数発生した。

(2)最大耐力までの層間変位曲線と最大耐力及びその時の層間変位の大きさには相違はみられないが、最大耐力以降の耐力劣化はNo.1より小さい。

§ 5. 接合部域の梁主筋の付着性状

図-6の最大荷重までの応力度分布図(上端筋)より、いずれの試験体も、接合部内で降伏したことが分かる。図-7に、各サイクルの最大荷重時の接合部域平均付着応力度(上端筋)を示す。No.1とNo.2を比較すると、繰り返し数の増加に伴い、No.2が劣化すること、又、No.1とNo.3から、No.3の方が付着劣化が若干小さいことが分かる。荷重サイクルが増すと、No.1、No.3では、曲げ理論値[1]の1/2程度、No.2では、1/4程度まで劣化する。

§ 6. 接合部終局耐力

6. 1 繰り返し回数と柱中間筋の影響

両者の接合部終局耐力への影響は認められなかった。柱中間筋については、既往の実験でも影響が無いことが指摘されている[2]。

最大耐力以前の大きい値の接合部せん断入力量 $\tau_p \approx 0.32 F_c$ (t_p : 平均表-1参照)の繰り返しは、接合部せん断ひび割れ幅を大きくせず、接合部終局耐力に影響を与えないことから、既往の接合部が梁曲げ降伏後に破壊したと報告された試験体は、梁曲げ降伏後の繰り返しによる接合部コンクリートの劣化等により、極端に潜在的な接合部耐力が低下しないと思われる。従って、梁曲げ降伏後に接合部破壊した試験体は、最大耐力時に梁曲げ降伏と同時に接合部も終局耐力となったのではないかと予想される。

6. 2 接合部終局耐力の評価

1. 接合部終局耐力の評価方法

本研究では、既往の種々の抵抗機構との対応性の検討の結果、一応、終局耐力の評価を、[3]の方法で行ってみた。接合部終局耐力時の機構は、せん断ひび割れ発生以降に形成される主たるコンクリート圧縮ストラットに依存し、梁、柱からの圧縮合力等から構成される合力(C)が主たるストラットの強度に達したことによって破壊すると考える。(図-8参照)

(i) ストラットに作用する合力C

$$C = \sqrt{V_{ch}^2 + V_{cv}^2} \begin{cases} V_B, V_C : \text{梁, 柱のせん断力} \\ V_{BCc}, V_{cCc} : \text{梁, 柱付根のコンクリート圧縮力} \\ V_{cv} = cCc + \Delta_c T_c - V_B \\ V_{ch} = BcC + \Delta_B T_c - V_C \end{cases}$$

(ii) ストラットの大きさ

梁及び柱の応力中心間距離 (J_b, J_c , 表-1参照) で囲まれたパネルを作用せん断力に対し、ブレース置換し、対角線方向のストラットを決定するものである。

ストラット断面積 A_B :

$$A_B = \frac{(J_b^2 + J_c^2)^{3/2}}{2 \cdot J_b \cdot J_c} \cdot \frac{G}{E_c} \cdot t_p = D_p \cdot t_p$$

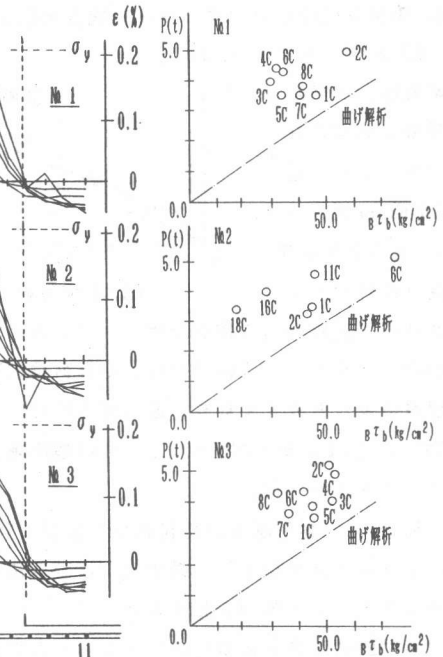


図-7 接合部域付着応力度

図-6 梁主筋応力度分布

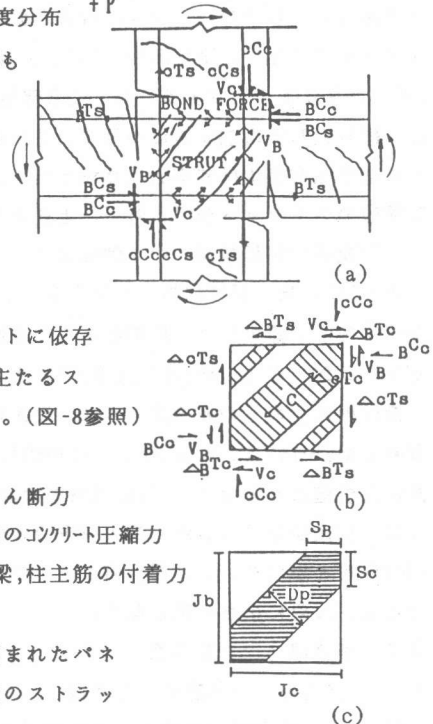
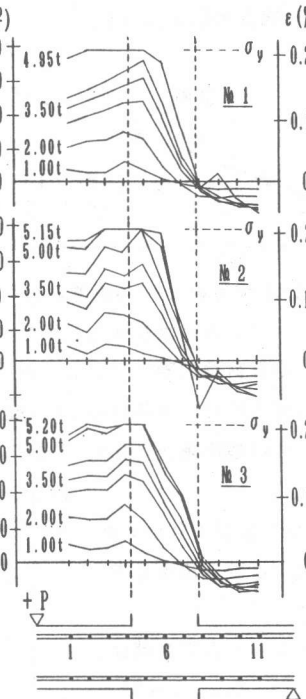


図-8 接合部破壊機構

[G : コンクリートせん断弾性係数 ($G/E_c = 1/2.3$)
 D_p : ストラットのせい, t_p : (梁幅 + 柱幅) / 2

2. 梁及び柱付根コンクリート圧縮合力($b_c C_c, c_c C_c$)

図-9、図-10に梁及び柱付根位置の主筋歪及びコンクリート歪(検長6cm歪ゲージ)より求めた梁及び柱付根コン

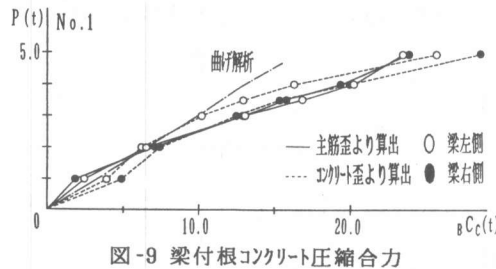


図-9 梁付根コンクリート圧縮合力

クリート圧縮合力の例を示す。いずれの試験体も、梁及び柱付根のコンクリート圧縮合力は、初期荷重段階では、曲げ解析による理論値と一致するが、徐々に理論値よりも大きくなり、最大荷重時に、理論値の2倍程度となる。梁付根圧縮合力は、No.1、No.3で23~28t、No.2で28~32t、柱付根圧縮合力は3体ともほぼ同じで、45t前後であった。

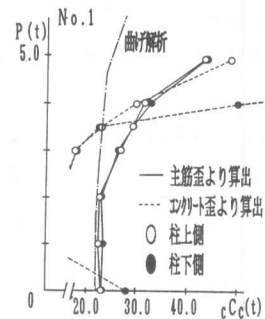


図-10 柱付根コンクリート圧縮合力

3. ストラット合力

図-11に、梁付根及び柱付根の主筋歪より求めたストラット合力を示し、図中に上述の方法より求めたストラット耐力を記入した。

各試験体の最大荷重時のストラット合力の値は、No.1でC=49.7t、No.2でC=60.1t、No.3でC=52.9tであった。以上のストラット合力と機構のストラット耐力の比は、No.1:0.86、No.2:1.04、No.3:0.92でかなりよく一致する。尚、接合部域の主筋からの付着伝達が、荷重が増加するにつれ、また、繰り返しが増加するにつれて、主たるストラット域で行われるようになり、ここで取り扱った接合部域の平均付着応力より求めた、 $\Delta_B T_c$ 、 $\Delta_C T_c$ より実際には大きい値となる。そこで、実験値のストラット合力は若干、上昇することが予想される。

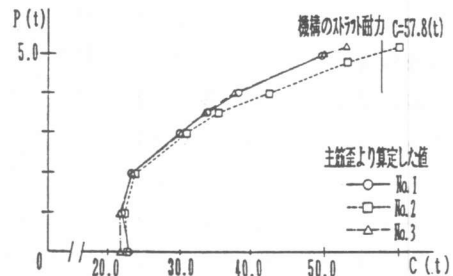


図-11 ストラット合力

4. 梁及び柱付根断面の中立軸位置

図-12に、梁及び柱付根のコンクリート歪測定値より算定した、圧縮縁から中立軸までの距離の変化の例(片側付根)を示す。

梁付根断面の圧縮域の大きさは、最大荷重時にNo.1~No.3は、9cm前後で、この値は、曲げ解析値より大きい。柱付根断面の場合は、測定値が乱れるが、最大荷重時の値は、11cm程度と思われ、曲げ解析値より、梁の場合とは、反対に小さい値となる。

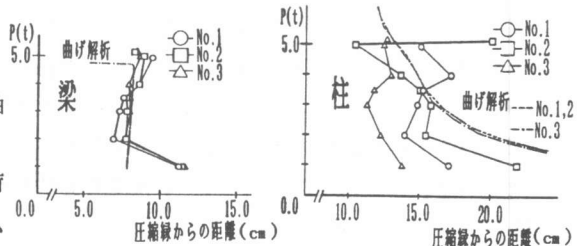


図-12 中立軸位置

§ 7. 接合部フープ筋の歪

7. 1 接合部フープ筋の歪の特徴

図-13に、接合部中央のフープ筋の歪の変化を、第1サイクル、最大耐力時、最大耐力時に降について示す。

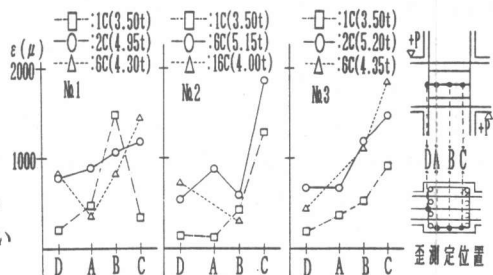


図-13 接合部フープ筋歪

最大耐力時の各試験体の歪は、降伏歪の半分程

度である。又、接合部幅面(D)の歪が、第1サイクル時では、他の位置A,B,Cより小さいが、2サイクル以降では、同じ様な値を示した。

最大耐力以降、どの試験体も、歪は余り増加しない。

7.2 接合部域フープ筋の歪値の評価

1. 評価方法 フープ筋の歪の生じる原因を考えると、梁主筋の主たるストラット域外の付着力は、フープ筋の歪の値と一次的な関係にあると思われる。そこで、[4]のようにストラット域外の梁主筋の付着力と補強筋引張合力が釣合うとして評価する。

2. 適用 上述の仮定から、各サイクルの歪は各サイクルの残留歪以降の歪増分として付着力が与えることを意味するものである。そこで、各サイクル毎における歪の増減をみるために、歪測定結果の値(実線)と計算された歪値(点線)(各サイクルのピーク点についてのみ求めた)の比較の例を図-14(接合部中央位置歪)に示す。

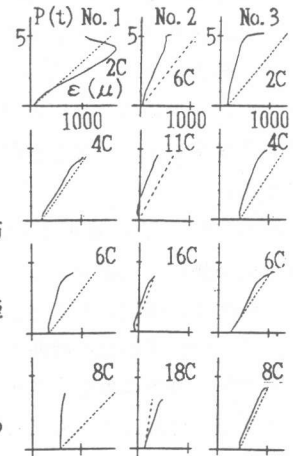


図-14 フープ筋歪の測定値と計算値の比較

一応の対応性はみられるが、全体的にみて、その特徴は、計算値が実験値より大きいことである。その原因は、接合部域付着応力度は、ストラット域と比較して、ストラット域外で小さいにも拘らず、接合部域の平均付着応力度を用いて計算しているからである。

又、ストラット域外の梁主筋の付着力に関連のあることは、最終サイクルに近づくにつれて、実験値の各サイクルの残留歪以降の歪増分が、徐々に小さくなることから推測できる。

§ 8. 接合部域柱中間筋の歪

8.1 接合部域柱中間筋歪の特徴

図-15に、柱付根と接合部中央位置の柱中間筋の荷重-歪曲線の例を示す。柱付根位置(a,d)の歪は、荷重 $P=0t$ の時は引張歪を呈し、通常なら圧縮側となる荷重を受けても、圧縮歪とならず、接合部の斜めひび割れの延長が測定位置を通過するため、大きな引張歪を生じる。これに対し、接合部中央位置(e,b)の3本の中間筋の歪が、最大荷重以降、圧縮側歪に移行し、接合部コンクリートの破壊に伴い、 $P=0t$ の時、柱軸力が中間筋と柱主筋で、維持されるようになる。

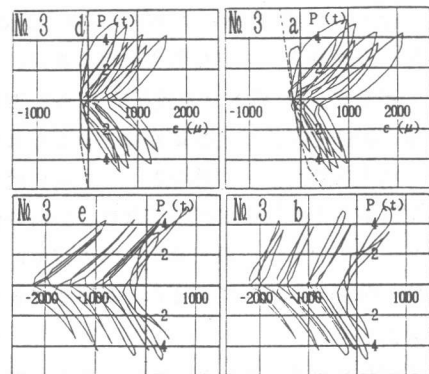


図-15 接合部域柱中間筋歪

図-17は、接合部中央断面における各試験体の各サイクル $P=0t$ の時の、軸力 $27t$ の柱主筋、中間筋、コンクリートの負担分の変化を示したものである。No.1とNo.2を比較してみると、繰り返し数が多く、接合部コンクリートの破壊の激しいNo.2の方のコンクリート負担分が小さくなっている。一方、No.1とNo.3を比較してみると、No.3のコンクリート負担分と柱中間筋負担分を加えたものが、No.1のコンクリート負担分に、ほぼ対応する。

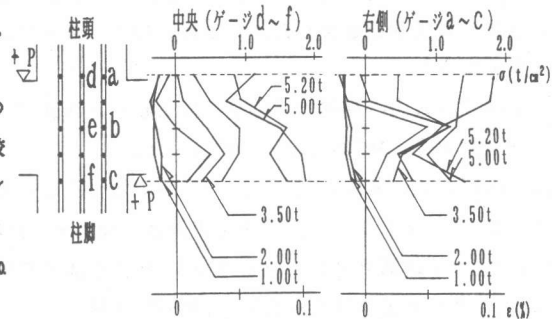


図-16 柱中間筋歪分布

このことは、No.3では接合部中央部のコンクリートの破壊に伴う、軸力負担をNo.1の場合のコンクリートに代わり柱中間筋が受け持ってくれたと解釈できる。

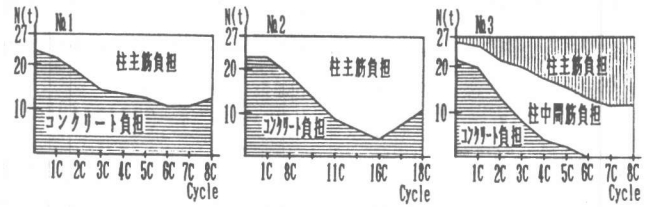


図-17 軸力負担割合

図-16に、最大荷重までの柱中間筋歪分布を示す。初期荷重段階では、通常の柱主筋の場合と同様、引張側は、圧縮側より大きい引張歪を呈するが、以降は逆転し、歪分布は、最大荷重に近づくにつれて、平坦となる。

8.2 接合部域柱中間筋の歪値の評価

柱中間筋の歪の生じる要因をフープ筋の場合と同様に考え、ストラット域外の柱主筋の付着力によるものとして評価する。

図-18に、フープ筋の場合と同様に、各サイクル毎に、計算値(点線)と実験値(実線)の比較(接合部中央位置歪)を示す。両者を比較してみると、対応性がみられる。

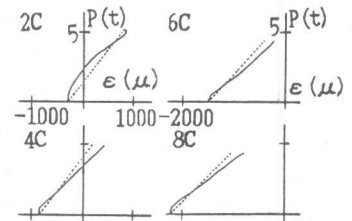


図-18 柱中間筋歪の測定値と計算値の比較

最大荷重以降の荷重 $P=0t$ の時点では、軸力は柱主筋と柱中間筋で負担していることが確認でき、そして、荷重 $P=0t$ からの荷重増加時の歪増分が前述のストラット域外の柱主筋の付着に関係することが理解できる。

§ 9. 結び

$\tau_p/F_c \approx 0.46$ の高い接合部せん断入力量の試験体における繰返し数の影響、柱中間筋の役割に関する実験より、次の結果が得られた。

- ① 繰返し数(最大耐力以前は $\tau_p \approx 0.32F_c$ で繰返し)と、柱中間筋の有無は、接合部終局耐力と最大耐力時の層間変位に影響することはないが、最大耐力以降の接合部耐力劣化に影響する。
- ② 柱中間筋とフープ筋の各サイクルの残留歪(荷重が零の時の歪)以降の歪増分値は、接合部域の主たるストラット域外の梁及び柱主筋の付着力が生じさせる。

又、柱中間筋は、最大荷重以降の荷重 $P=0t$ で、軸力のみ作用している時点では、軸力は柱主筋と柱中間筋で負担していることが確認できた。

【謝辞】

本研究を行うにあたり、芝浦工業大学卒論生(1989年度)、井澤紋規、竹腰英俊、矢萩大作、山泉光諸君の御協力を得ました。又、試験体製作に際し、大成プレハブ、永海氏、小浜氏、高野氏、金城氏にお世話頂きました。ここに、以上の方々に、厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] 藤井、青山、梅村：「材料特性より求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係」建築学会大会 1973年10月 P1261~1262
- [2] 後藤、城、紫田：「RC十字型柱・梁接合部のせん断抵抗性状に対するせん断補強筋の効果について」コンクリート工学論文報告集 1989年 11巻-2号
- [3] 上村：「鉄筋コンクリート内部梁・柱接合部の終局強度に関する研究」コンクリート工学論文報告集 1986年 8巻
- [4] 上村、荒井：「鉄筋コンクリート内部梁・柱接合部の破壊機構に関する研究」コンクリート工学論文報告集 1987年 9巻-2号