

論文 鉄筋コンクリート造柱-フラットスラブ接合部のせん断補強効果に関する実験的研究

鈴木紀雄*1・井上貴之*2・永井覚*3・丸田誠*2

要旨: 鉄筋コンクリート造柱-フラットスラブ接合部の周囲に配筋されたフープ筋の効果を調べることを目的とした実験を行った。その結果、水平力方向のスラブ筋に巻いたフープ筋は変形能力を向上させること、水平力に直交する方向のスラブ筋に巻いたフープ筋は、ねじり強度と変形能力を増大させることが明らかとなった。

キーワード: フラットスラブ, 接合部, パンチングシア破壊, フープ筋

1. はじめに

梁の無いフラットスラブ構造には、建物のデザインの自由度が大きくなる、使いやすい空間ができるといった利点がある。しかし構造的には、鉛直力を支える柱との接合面積が小さいために、パンチングシア破壊と呼ばれる脆性的な破壊を生じやすいという欠点を持っている。地震力の大きい我が国の建物では、柱との接合部において、スラブの自重や床荷重のような長期荷重の他に、水平力による曲げモーメントを伝達しなくてはならないので、より厳しい応力状態を想定する必要がある。

このような応力状態のスラブ-柱接合部に関して、我が国では、吉崎・狩野によって一連の実験的研究が行われ¹⁾、中柱接合部に対して建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準に示されている、以下のようなパンチングシア強度の算定式が提案されている。

$$\frac{V}{V_0} + \frac{M}{M_0} = 1 \quad (1)$$

$$V_0 = 1.06 \cdot \sqrt{F_c} \cdot 2 \cdot (c_1 + c_2 + 2d) \cdot d \quad (2)$$

$$M_0 = M_f + M_s + M_t \quad (3)$$

$$M_f = 0.9 \cdot \sum a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (4)$$

$$M_s = 1.06 \cdot \sqrt{F_c} \cdot (c_1 + d) \cdot d \cdot (c_2 + d) \quad (5)$$

$$M_t = 6.36 \sqrt{F_c} \cdot \frac{d^2}{2} \cdot \left\{ (c_1 + d) - \frac{d}{3} \right\} \cdot 2 \quad (6)$$

V, M : 伝達する鉛直力とモーメント

V_0, M_0 : 伝達できる鉛直力とモーメント

M_f, M_s, M_t : 曲げ, せん断, ねじりにより伝達されるモーメント

$\sum a_t$: 下記に示す算定断面幅内のスラブ上端筋断面積, σ_y : スラブ筋の降伏強度, d : スラブの有効厚さ, F_c : コンクリート圧縮強度, c_1 : 柱せい, c_2 : 柱幅

算定断面は、柱周りに柱面からスラブ有効厚さの1/2離れた位置にとる。

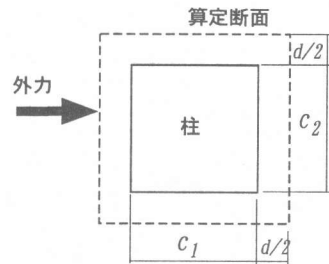


図-1 強度算定断面

ACI 規準や CEB-FIP モデルコードではフープ筋による補強効果が認められているが、吉崎らの式はコンクリートのみ依存する形となっている。最近、柱に定着されるスラブ筋を梁筋とみなし、これにせん断補強した試験体による実

*1 鹿島技術研究所 工博 (正会員)

*2 鹿島技術研究所 (正会員)

*3 鹿島小堀研究室 (正会員)

験²⁾も行われているものの、パンチングシア破壊に対するせん断補強筋の効果には不明な点が多い。そこで本研究では、フープ筋の量や配置を主なパラメータとした柱-フラットスラブ接合部の実験を行い、フープ筋の効果を調べることにした。

2. 試験体

建物の外柱部分を取り出した、ほぼ 1/3 縮尺の試験体 7 体 (図-2) を製作した。7 体共通して、柱は 300mm 角の正方形、スラブは厚さが 120mm で長短辺がそれぞれ 2700mm と 1500mm である。柱には、変形を極力抑えるために曲げ、およびせん断補強筋を十分に入れるとともに、曲げひび割れが生じないようにするために軸力を導入した。加力方向のスラブ筋は、D10 鉄筋を柱幅の範囲では 50mm 間隔で、それ以外の範囲では 80mm 間隔でダブル配筋とした。試験体 No.7 を除いて梁形を設けていないが、柱幅範囲を仮想的に梁とみなし、以後、短辺方向の梁部分を

「梁」、長辺方向の梁部分を「直交梁」と称することにする。

本実験のパラメータは、表-1 に示すように、①梁部分のフープ筋の間隔、②梁部分のフープ筋の幅、③直交梁のフープ筋の有無、④直交梁のせい、の四つである。

試験体 No.1 は、梁と直交梁のいずれにもフープ筋を有しないが、パンチングシアに対しては、柱側面のスラブのねじり抵抗が寄与することがこれまでの研究から指摘されているため、No.2 ではねじり抵抗を増大させる要素として直交梁の全長に渡ってフープ筋を設けた。試験体の直

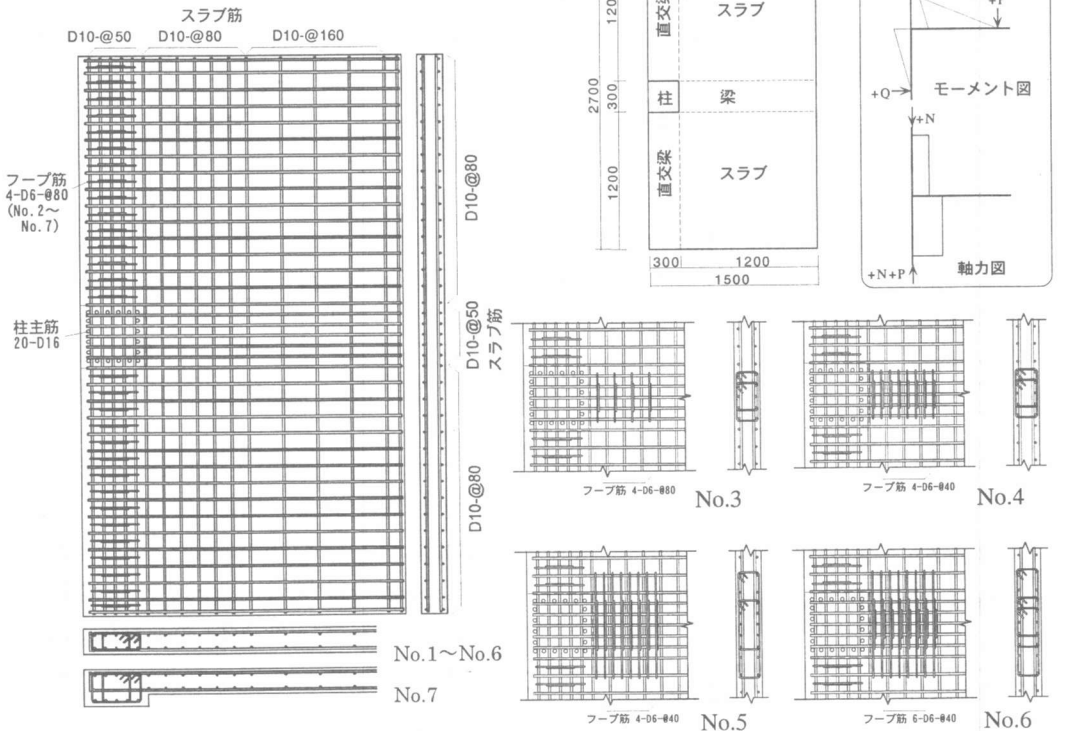


図-2 試験体

表-1 試験体一覧

試験体名	梁フープ筋		直交梁		コンクリート強度(N/mm ²)	鉄筋	材質	降伏強度(N/mm ²)	引張り強度(N/mm ²)	
	本数と間隔	最大幅(mm)	フープ筋	直交梁せい(mm)						
No.1	なし	300	なし	120	28.6	D10 No.1~No.6 スラブ筋	SD345	390.0	548.9	
No.2					29.2					
No.3	4-D6-@80	540	4-D6-@80	120	28.4			D10 No.7スラブ	381.2	536.2
No.4	4-D6-@40				28.6					
No.5	4-D6-@40				30.0			D6 フープ筋	403.0	499.1
No.6	6-D6-@40				29.7					
No.7	なし	300		180	28.6	D16 柱主筋	394.0	667.2		

交梁は、実際の建物においては外周フレームの梁に相当し、フープ筋を入れるのが一般的と考えられるので、No.3~No.7の5体でも、No.2と同様の直交梁フープ筋を設けることにした。No.3~No.6は梁部分の補強法のみがNo.2と異なっている。

No.7はNo.2の直交梁のせいを180mmとした試験体である。

材料特性は、表-1に合わせて示す。

3. 加力方法

試験体の短辺方向に水平力が作用する場合を想定した加力を行った。図-3に示すように、実際の建物における向きから90°回転させ、柱の両端をピンローラー支持とした。短辺方向のスラブ先端に様な変位を与えるために剛な鋼材ではさみつけ、これに2台の押し引きジャッキで水平力を加えた。加力は、スラブの変形角で制御した。長期荷重に相当する加力が行っていないが、スラブのせん断力が、式(1)におけるVとして作用する。

また、接合部においてスラブに軸力が作用するのを防ぐために、スラブの自重とスラブ先端の自重を錘によって相殺した。

4. 実験結果

4.1 実験経過

7体の試験体共通に第1サイクル(変形角1/400)でスラブの柱近傍に曲げひび割れが発生した。直交梁にはNo.3を除いて第2サイクル(変形角1/200)の負方向加力時にねじりによるひび

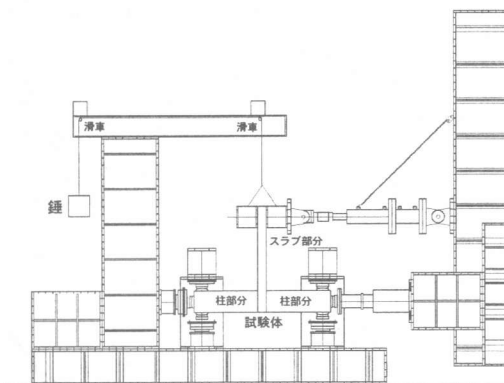


図-3 加力装置

割れが発生した。スラブ筋は第4サイクル(変形角1/100)で降伏した。最大荷重時の変形とそれ以降の挙動は試験体毎に異なり、以下のようになった。

- ・No.1: 変形角が1/50のときに最大荷重となった。変形角1/25に向かう途中で直交梁のねじり破壊が著しくなり、耐力が低下した。また、柱前面のスラブが面外破壊して広い範囲でコンクリートが浮き上がる状態となった(図-4)。

- ・No.2: 最大荷重に達したのは変形角が1/25のときであった。また、No.1と同様にスラブの面外破壊が発生し、変形の増大に伴って徐々に耐力が低下した。

- ・No.3~No.6: 与えた最大変形(変形角1/10)まで耐力低下が生じなかった。No.1, No.2で発生したスラブの面外破壊は生じなかった。

- ・No.7: No.2と同様に、変形角が1/25のとき

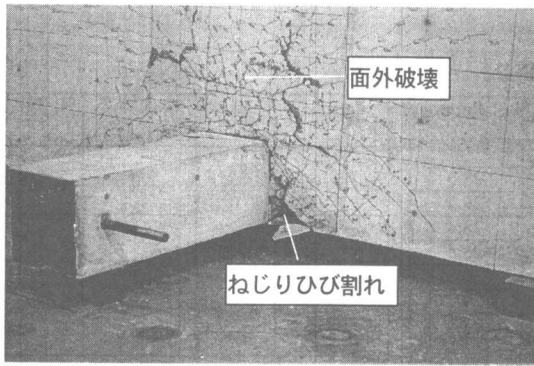


図-4 No. 1 のひび割れ

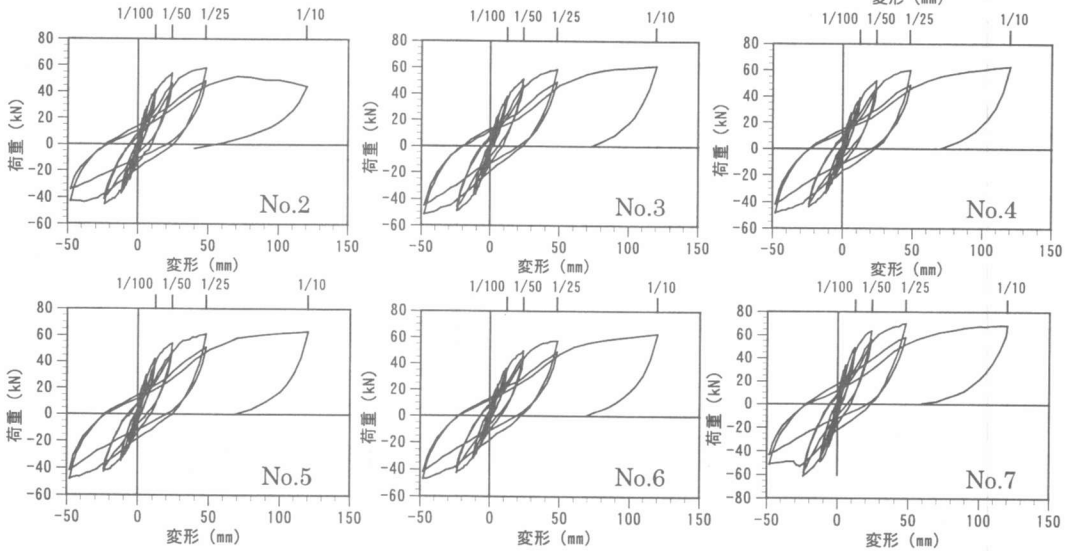
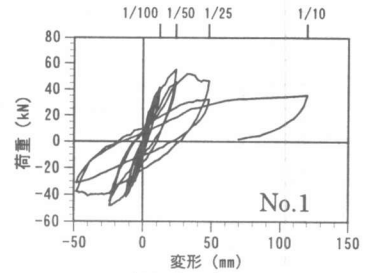


図-5 荷重-変形関係

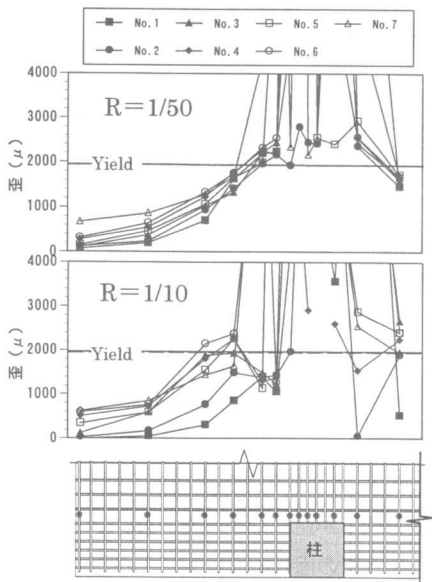


図-6 スラブ筋の歪

に最大荷重に達した。柱前面のスラブの面外破壊が発生したが、変形の増大に伴う大きな耐力低下は生じなかった。

4.2 履歴特性

荷重-変形関係を図-5に示す。ループ形状には若干のピンチングが見られるものの、履歴面積の大きな特性となっている。No.3~No.6の復元力特性は、互いによく似た形となった。

4.3 破壊モード

図-6に、変形角が1/50と1/10のときの、柱面から50mm離れた位置における加力方向のスラブ筋の歪分布を示す。柱から離れるに従って歪は小さくなり、半数程度のスラブ筋は最大変形に至るまで降伏していない。

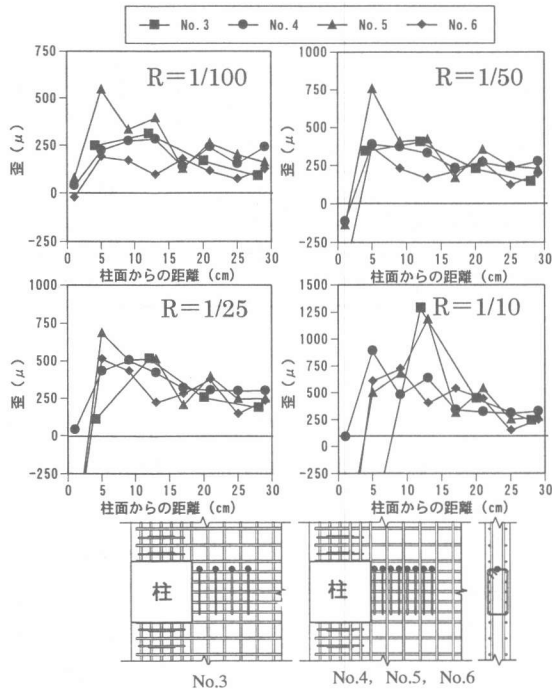


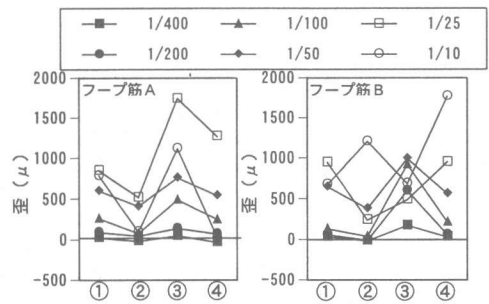
図-7 梁フープ筋の歪

表-2 には最大耐力と曲げ強度の計算値を示す。曲げ強度は、柱面位置を危険断面として、梁の曲げ強度式によって計算したものである。いずれの試験体も、最大耐力は曲げ強度の 55~71% 程度しかなく、降伏したスラブ筋も半数程度であること、および破壊経過からパンチング破壊したものと判断できる。

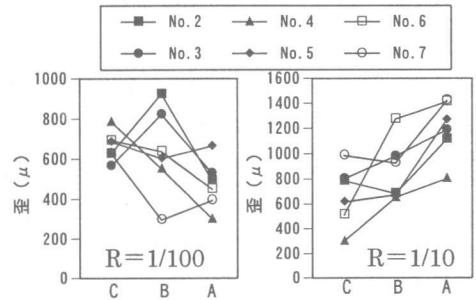
4.4 梁フープ筋の効果

図-7 に、変形角が 1/100, 1/50, 1/25, 1/10 の時点におけるフープ筋の歪を比較して示す。降伏に至るものはないが、変形が増大するに従って歪が増大しており、フープ筋が面外せん断に抵抗していることが分かる。試験体による違いは必ずしも明確ではないが、いずれの試験体でも、柱面から 5mm~15mm 程度の範囲でフープ筋の歪が大きい。

破壊経過やフープ筋の歪より、梁にフープ筋のない No.2 で見られた変形増大に伴う耐力低下はスラブの面外破壊のためであり、No.3~No.6 では柱幅内のフープ筋がスラブの面外破壊を抑制したために、耐力低下が起らなかったもの



(a) No. 2



(b) 全試験体の③の歪
図-8 直交梁フープ筋の歪

と考えられる。

4.5 直交梁フープ筋の効果

直交梁にフープ筋の無い No.1 に比べるとフープ筋を入れた No.2 の方が最大強度に達するときの変形が大きく、変形増大に伴う耐力低下が緩やかであった。図-8(a)は、No.2 の柱に最も近い 2 本の直交梁フープ筋の 4 辺に貼った歪ゲージの値の変化を示すが、4 辺ともに変形の増大に伴って負担する引張り応力が増大しており、ねじりに対して抵抗していることが推定できる。

図-8(b)は、変形角が 1/100, 1/10 のときの、各試験体の直交梁フープ筋歪を示す。No.3~No.6 の試験体でも、No.2 と同じように、変形の増大に伴って歪が大きくなっている。直交梁にフープ筋のない No.1 で耐力低下が大きくなった変形

表-2 諸耐力一覧

	ひび割れ実験値		スラブ筋降伏実験値		最大荷重実験値		曲げ強度 計算値(kN)	パンチング強度 計算値(kN)
	荷重(kN)	変形角	荷重(kN)	変形角	荷重(kN)	変形角		
No.1	12.8	1/789	30.5	1/170	54.9	1/50	100.4	42.6
No.2	14.8	1/548	32.8	1/154	58.0	1/25	100.4	44.0
No.3	10.3	1/769	30.4	1/144	61.2	1/10	100.4	43.6
No.4	5.8	1/2000	31.7	1/145	62.5	1/10	100.4	43.7
No.5	12.8	1/960	32.8	1/153	63.0	1/10	100.4	44.4
No.6	6.5	1/1446	31.2	1/132	62.7	1/10	100.4	44.2
No.7	18.4	1/574	46.4	1/114	70.1	1/25	98.2	64.0

角が 1/100 の時点では、歪の最大値は 600~900 μ 程度になっている。

金らは、加力方向のスラブ筋が多い場合にはスラブ筋がねじりに抵抗するために強度が大きくなることを指摘し²⁾、梁のねじり強度式を変形した次式を提案している。

$$M_t = 3(c_1 + d)h^2 \sqrt{F_c} + 0.72 \frac{(c_1 + d)d_l a_t \sigma_y}{s} \quad (7)$$

h : スラブ厚

d_l : スラブの上端, 下端鉄筋間距離

s : スラブ筋間隔

今回の実験でも、直交梁にねじり抵抗要素としてフープ筋を入れることの有効性が確認された。

4.6 直交梁のせいの効果

直交梁の梁型がない No.2 と比較すると、梁型のある No.7 の最大耐力は 21% 大きくなり、変形増大に伴う耐力低下も見られない。直交梁のせいを大きくするとねじり抵抗が増大することにより、パンチングに対する強度や変形能力が増大すると考えられる。

4.7 最大耐力

表-2 に示したパンチングシア強度の計算値は、式(3)中の M_t を、オリジナルの式(6)と金らが提案した式(7)の大きい方として算定したものである。直交梁フープ筋がある No.3~No.7 では式(7)の方が式(6)より 6% ほど M_t の値が大きくなる。算定にあたっては、式(1)中の伝達モーメント M を、鉛直力 V に加力スパン 1.2m を乗じた値と仮定した。いずれの試験体においても実験値は計算値を上回っているため、この方法を用いれば、安全側の設計ができると考えられる。

5. まとめ

柱-フラットスラブ接合部のパンチングシア破壊に対するフープ筋の影響を実験的に検討したところ、以下のことが分かった。

- (1) 梁部分を補強すると、柱前面のスラブの面外破壊を抑制でき、変形能力が向上する。最大強度も若干上昇するが、最大強度を発揮するときの変形は非常に大きいので、設計上は強度上昇を期待しない方がよい。
- (2) 梁部分のフープ筋は、スラブ厚の 3 倍程度の範囲に 0.5% 程度入れておけばよい。実際にはもっと少なくてもよいと考えられるが、今回の実験では、下限値は把握できなかった。
- (3) 最大強度は、吉崎・狩野の式とスラブ筋のねじり強度への寄与を考慮した金らの式を組み合わせ、安全側に算定できる。
- (4) 直交梁部分のフープ筋はねじり抵抗力を増大させ、パンチングシア破壊に対する強度や変形能力を向上させる。
- (5) 直交梁のせいを大きくすることも、ねじり抵抗力の向上に寄与する。

参考文献

- 1) 吉崎征二, 狩野芳一: フラットプレート構造の柱-スラブ接合部に関する研究, 日本建築学会論文報告集第 309 号, pp.29-40, 1981.11
- 2) 金亨基, 隈澤文俊, 中埜良昭, 岡田恒男: フラットプレート構造の柱・スラブ接合部のねじりモーメントの評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.129-130, 1996