

柱とスラブからなるフラットプレート架構の構造性能

－その2 水平加力実験－

Experiment of Flat Plate Structure

- Part 2 Horizontal Loading Tests -

岸本 剛* 早川邦夫*
岡 靖弘** 平松一夫***

要 旨

SI（スケルトン・インフィル）住宅に対応する工法として、柱と梁型の無いスラブからなるフラットプレート構造がある。フラットプレート構造では梁が無いため自由な空間構成が可能となるが、地震の挙動については不明な点が多いため従来では他の耐震要素（耐震壁やコア壁など）と併用されている。そのため地震時の特性および設計条件を明らかにするため構造実験を実施した。基本特性を把握した前回の実験に引き続き、今回は実建物への適用を想定し、スラブのプレキャスト化、長スパン化、最上階での収まり等が構造性能に与える影響を確認した。本報ではこれらの実験の概要について報告する。

キーワード：フラットプレート、鉄筋コンクリート、スラブ

1. まえがき

建物の長寿命化に伴い住戸プランの変更を可能とするため室内に梁形を出さない大型スラブを用いた計画が増加している。対応する工法として、図-1に示すような梁材が無く柱に緊結されたスラブを利用する構造形式（以下：フラットプレート構造）がある。本工法により、梁が無いため自由な空間構成が可能となる。本報では前報¹⁾に続きフラットプレート構造の特性を把握するため実施した構造実験について報告する。前報では、スラブの曲げ耐力やパンチング耐力は既往の式で概ね評価できることや、主筋量が同じ場合でも柱近傍に集中して配置した方が広範囲に分散して配筋するより履歴性状がよくなること等の基本特性を把握した。

本報では、これらの実験結果を踏まえ実建物への適用

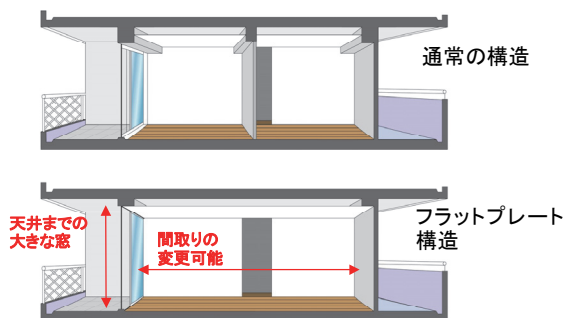


図-1 フラットプレート構造

を想定し、スラブのプレキャスト化（以下 PCa 化）、長スパン化に伴う鉛直荷重の影響および最上階に適用した場合の特性や補強方法を把握するため実施した構造実験について報告する。

2. 実験計画

2.1 試験体

表-1に試験体諸元を、表-2に材料試験結果を、図-2に試験体形状を示す。試験体は約 1/2 縮尺の柱とスラブで構成される十字形試験体 6 体、ト字形試験体 1 体および最上階を対象とした T 字形試験体 1 体である。

試験体では、スラブの幅のうち、柱幅+スラブ厚を梁幅と考えスラブ筋を他よりも密に配筋している。この範囲のスラブ筋は一般の梁の主筋のように積極的に地震力に抵抗させるためここでは梁主筋と呼び、それ以外のスラブ筋と呼び方を区別することとした。また、試験体には柱面よりスラブ厚さ分の長さの範囲にパンチング破壊を防止することを目的にパンチング補強筋を配置した。補強筋量(p_{wp})は柱周りの補強面積に対する補強筋の総断面積で定義し、 $p_{wp}=0.45\%$ 程度を配筋している。補強筋形状は片端 90° フック、他端 135° フックとしている。柱面よりスラブ厚さ分の長さの範囲以外では幅を柱幅としたせん断補強筋を配置し、せん断補強筋量(p_s)は約 $p_s=0.2\%$ とした。せん断補強筋の形状はパンチング補強筋と同じである。

*技術研究所 **東京支社建築設計部 ***技術本部建築部

N-8、N-9は柱形状を扁平柱（形状比は約2：1）とした試験体でありN-8は柱幅325mm、柱せい700mmで、N-9は柱幅700mm、柱せい350mmである。N-10～13は施工性を考慮しスラブの一部をハーフPCaとした試験体である。N-10は梁主筋を配置し、梁と考える幅（柱幅+スラブ厚の範囲）を梁下端主筋が内蔵されたハーフPCa（以下ハーフPCa梁）とし、それ以外は通常の床材のプレキャストに相当するハーフPCa床板（以下ハーフPCa床板）としている。ハーフPCa梁間の梁下端主筋の継手には機械式継手を用い、継手位置は柱面よりスラブせいの位置（継手中央）とした。ハーフPCa梁は厚さ100mmで、ハーフPCa床板は35mmである。これに対しN-11～13はスラブすべてにハーフPCa床板を配置し、その上部に梁主筋およびスラブ筋を配置する形式としている。

またN-11～13は鉛直荷重と水平荷重を同時に受けた場合の影響を把握するためスラブ上面に鉛直荷重を導入した試験体である。鉛直荷重はパンチング危険断面位置においてロングスパンの実建物と同等程度のせん断応力度（0.6N/mm²）となるように設定した。N-12、N-13の違いは補強筋の有無であり、各補強筋が耐力及び変形性能に与える影響を把握するため、N-13ではパンチング補強筋、せん断補強筋とも配置していない。

G-2は直交梁付きト字形試験体で、前報¹⁾のG-1より直交梁幅を柱せいより小さくした試験体である。梁主筋の定着方法は、柱コア内（Hoop内）へは機械式定着板を用い、定着長は柱せいに対し3/4倍とした。直交梁への梁主筋の定着は折り曲げ定着とした。G-2はN-10、N-11と同様にもっとも厳しい条件を想定して、コンクリートFc36、鉄筋鋼種SD490の組み合わせとしている。

T-1は最上階を想定した試験体である。柱主筋の定着には機械式定着板を用い、定着長は柱主筋径に対し7.8倍とスラブ厚が小さいため一般に比べ非常に小さくなっている。そのため柱スラブ接合部にはスラブの曲げモーメントを柱筋に伝達する目的で加力方向に逆U字形の柱頭補強筋を、加力方向の主筋を押さえ込む役割で梁主筋上部より加力方向と直交方向に拘束筋を配置した。柱頭補強筋および拘束筋の定着長は約25d（d：鉄筋径）である。

2.2 載荷方法

図-3に載荷装置図を示す。載荷は柱に一定軸力（0.1B_cσ_B）を与えた状態で、各試験体とも上下柱の先端部をピン・ローラー支持しスラブ両端部の加力点変位を逆対称に制御して行った。載荷履歴は、層間変形角をR=±1/400、1/200、1/100、1/67、1/50、1/33、1/25radを2

表-1 試験体諸元

記号	配筋方法	スラブ厚 (mm)	柱形状 (mm)	全スラブ幅 (mm)	Fc (N/mm ²)	ρ _{t1} (%) ¹⁾	ρ _{t2} (%) ²⁾	ρ _w (%) ³⁾	ρ _{wp} (%) ⁴⁾	せん断余裕度 Pp/Pmu ⁵⁾	配筋				特記	
											スラブ筋		補強筋			
											B _c +D _s 内	左記以外	せん断補強筋	パンチング補強筋		
N-8	集中	170	325×700	2100	48	2.30	1.48	0.2	0.41	1.30	8-D16 (SD490)	10-D10	3-D6@140	60-D6	扁平柱（柱せい大）	
N-9			700×350			2.29	1.24	0.2	0.41	1.29	12-D16 (SD490)	7-D10	6-D6@140		扁平柱（柱幅大）	
N-10		180	450×450	1350		36	2.11	1.19	0.2	0.45	1.36	10-D16 (SD490)	10-D6	4-D6@140	64-D6	ハーフPCa梁 +ハーフPCa床板
N-11		170					1.57	0.2	0.43	0.99	10-D10	4-D6@140	56-D6	長期軸力		
N-12							2.52	1.34	-	-	1.12	10-D16 (SD390)	10-D6	56-D6	長期軸力	
N-13							-	-	-	-	-	-	-	-	N-12に対し補強筋無し	
G-2							140	3.68	2.19	0.2	0.44	1.00	12-D16 (SD490)	10-D6	4-D6@140	20-D6
T-1	180	1.34	0.79	0.2	0.45	2.06	10-D13	12-D6	4-D6@140	64-D6	T字形					

- 1) ρ_t=a_t/(B_c+D_s)/d a_t: B_c+D_s内引張鉄筋断面積(mm²)、B_c:柱幅(mm)、D_s:スラブ厚(mm)、d:有効せい(mm)
- 2) ρ_t=a_t/3B_c/d a_t: 3B_c内引張鉄筋断面積(mm²)、B_c:柱幅(mm)
- 3) ρ_w=a_w/B_c@ a_w: B_c内せん断補強筋断面積(mm²)、@:ピッチ(mm)
- 4) ρ_{wp}=a_{wp}/((B_c+D_s)*(D_c+D_s)-B_c*D_c) a_{wp}:柱面よりスラブ厚D_sの範囲内に配置した鉛直筋断面積(mm²)
- 5) P_p:パンチング破壊時のスラブ先端荷重(N)、P_{mu}:スラブ曲げ破壊時のスラブ先端荷重(N)
ここで D6、D10、D13の鋼種はSD295A

表-2 材料試験結果

a) 鉄筋

呼び名	種類	試験体	降伏強度
			σ _y (N/mm ²)
D6	SD295A	N-8~9, G-2	351
		N-11~13, T-1	347
D10	SD295A	全試験体	347
D13	SD295A	T-1	361
	SD390	T-1	435
D16	SD345	T-1	386
	SD390	N-12, 13	442
	SD490	N-8~11, G-2	541

b) コンクリート

使用試験体	圧縮強度	ヤング係数
	σ _B (N/mm ²)	E _c (kN/mm ²)
N-8, 9	47.2	30.6
N-10, G-2	35.0	28.3
N-11~13, T-1	40.2	30.1
N-10 (PCa部)	32.7	29.1
N-11~13 (PCa部)	43.4	29.2

サイクルずつ繰り返し $R=+1/10\text{rad}$ までの片押しとした。同図に併せて鉛直荷重の加力概要を示す。試験体N-11~13はスラブ上面に鉛直荷重を作用させている。鉛直荷重は、柱芯から500mmの位置に配置された柱幅または柱せ

いと等しい長さのH形鋼を、加力桁を介して、2台の350kN油圧ジャッキで鉛直上方から加力することによって導入した。

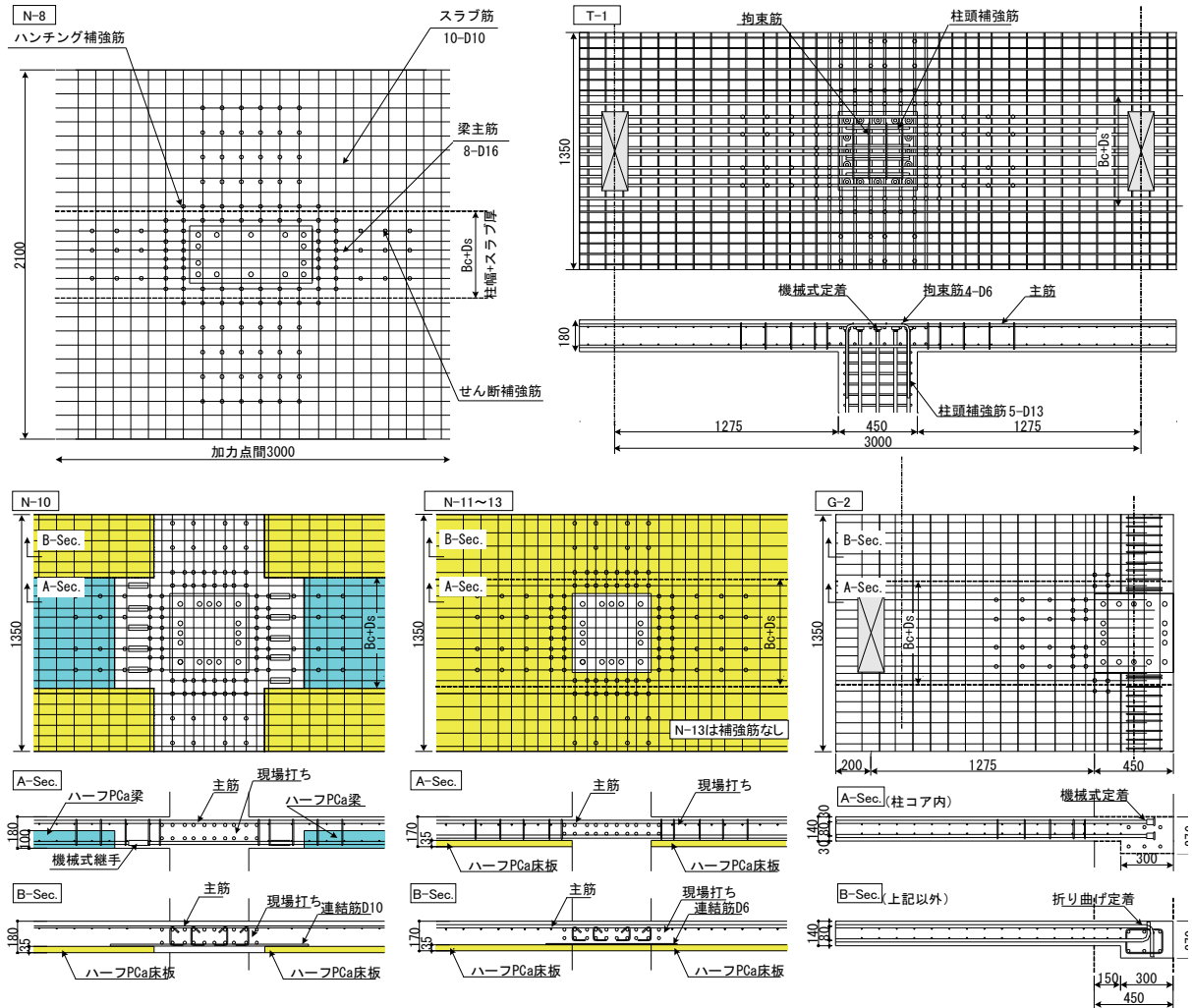


図-2 試験体形状

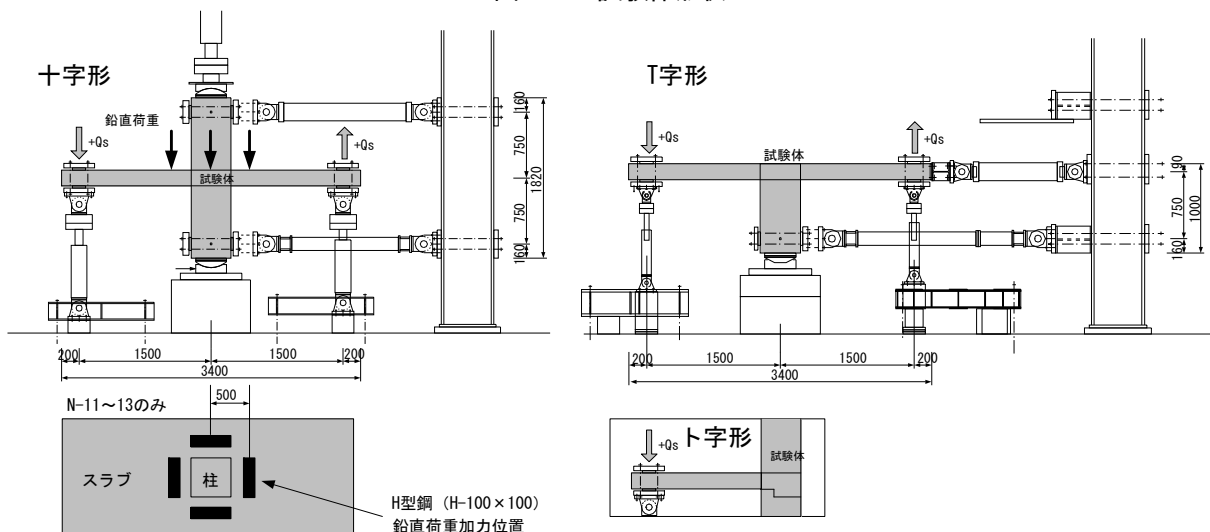


図-3 載荷装置図

3. 実験結果

3.1 破壊性状

写真-1に N-8、N-10、G-2 の最終破壊状況を示す。各試験体ともに、スラブ上面では、柱断面の角からスラブ全幅に沿う断面（スラブ危険断面）で発生した曲げひび割れが拡大し、圧縮側コンクリートの圧壊が生じた。

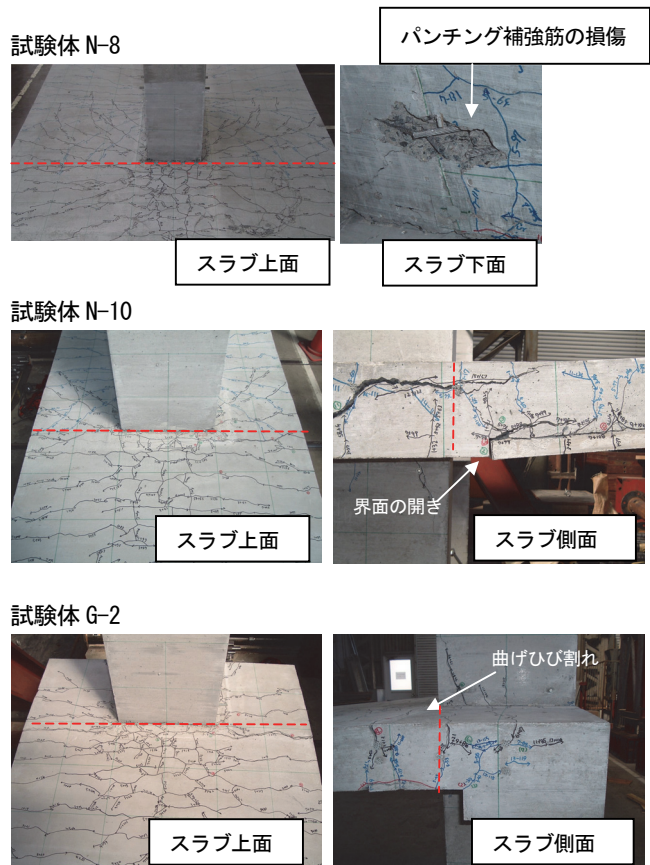
N-8 では他の試験体と比較してシアスパンが短いため、柱前後面の曲げモーメントあるいはせん断力によるフラットプレート梁の損傷が顕著であり、最終的に上面での隆起や下面でのパンチング補強筋下端の 90° フックの損傷がみられた。N-10 におけるハーフ PCa 床板と後打ちコンクリートの開きは、 $R=40 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時で 5.0mm 以上であった。

G-2 では直交梁背面で $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ に直交梁のねじれに伴うひび割れが発生したが、これらのひび割れの進展および拡大はわずかであり最終的にスラブ危険断面位置の曲げひび割れが大きく開いた。

3.2 荷重変形関係

各試験体の R-Qs 関係を図-4 に示す。ここで Qs はスラブ先端に作用させた荷重、R は層間変形角である。

N-8 では梁主筋が降伏した後にパンチング補強筋およびせん断補強筋が降伏し、最大耐力に達した後、スラブ危険断面でコンクリートの圧壊が生じ耐力が低下した。最終変形時には柱前後面の損傷が顕著であり、シアス



--- スラブ危険断面位置
写真-1 最終破壊状況

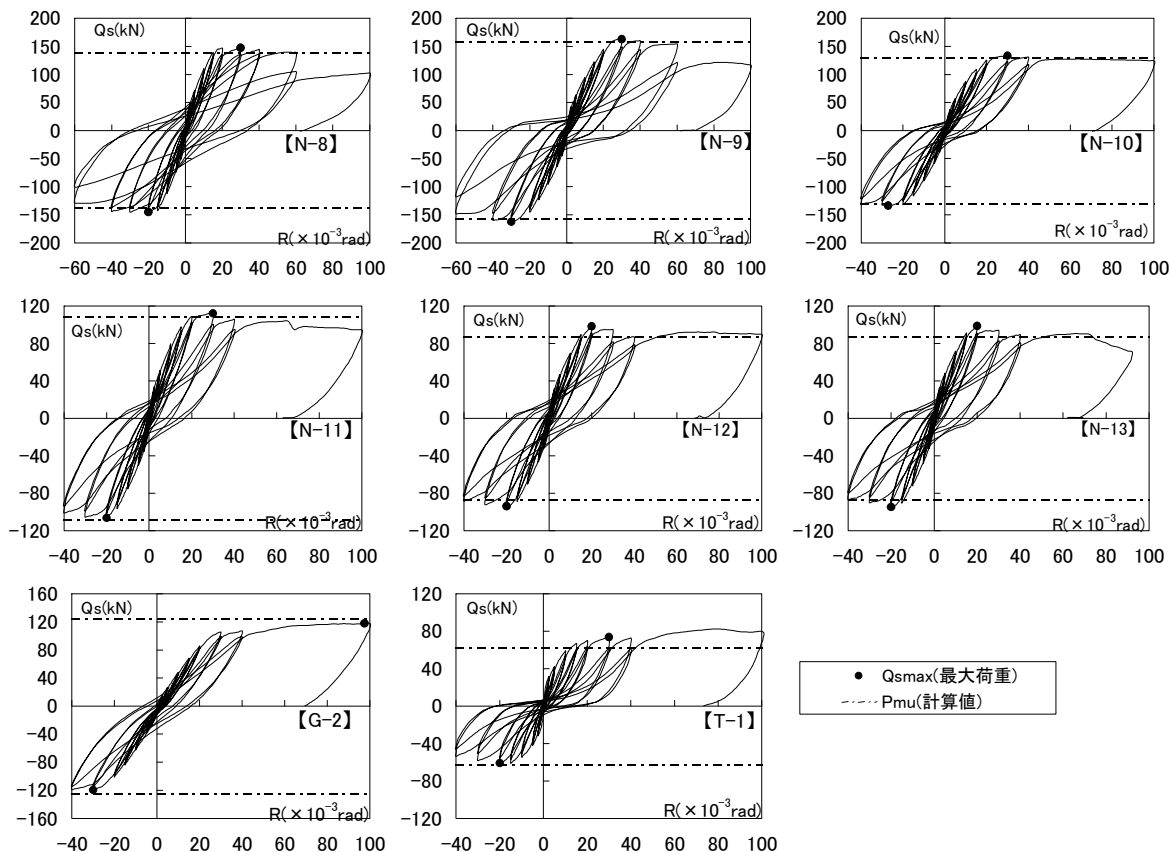


図-4 荷重変形関係

ンが短いので柱前後面で伝達されるモーメントが不足したためと推察される。N-10 では、梁主筋が降伏した後、スラブ側面のひび割れとハーフ PCa 床板と後打ち部の界面の開きが拡大したが耐力低下はみられなかった。また、N-11 や N-12 でも耐力低下はみられず、フラットプレート構造において本形式でスラブの一部を PCa 化した場合においても問題ないと考えられる。なお、N-12 では耐力の低下はみられなかったがパンチング補強筋、せん断補強筋を配置していない N-13 では $R=73 \times 10^{-3} \text{rad}$ に柱角からのひび割れが拡大し耐力低下した。これにより N-12 ではスラブの曲げ破壊が、N-13 ではスラブ曲げ降伏後のパンチング破壊が発生したと考えられる。

G-2 では梁主筋の定着破壊、直交梁のせん断破壊やねじれ破壊などによる急激な耐力の低下は発生せず、ほぼ最終変形時に最大耐力に達した。T-1 では、梁主筋の曲げ降伏後も耐力が増加し、スラブ側面のせん断ひび割れを経て、 $R=80 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時にせん断ひび割れが急激に拡大したが急激な耐力低下は生じなかった。

3.3 最大耐力

表-3 に最大耐力を、図-5 に前シリーズも含めた $Q_{smax}/P_{mu}-P_p/P_{mu}$ 関係を示す。ここでスラブ曲げ耐力破壊時の計算値²⁾は(1)式に、スラブのパンチング破壊時の計算値³⁾は(2)式に示されるパンチング相関式より左辺=右辺として求めた。スラブが曲げ破壊した試験体ではスラブ曲げ破壊時の計算値 (P_{mu}) に対する最大耐力実験値 (Q_{smax}) の比は概ね 1.0 以上であり耐力式は従来の梁の算定式で概ね安全に評価できることが確認できた。なお、G-2 が 1.0 以下であったが原因の1つとしてスラブの引張鉄筋比 (p_{t1}) が 3.68%と大きいことが考えられる。

$$M_y = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (1)$$

- M_y : 曲げ終局モーメント (N・mm)
- a_t : 引張鉄筋断面積 (mm^2)
- σ_y : 主筋降伏点 (N/mm^2)
- d : 引張側梁主筋の圧縮縁までの距離 (mm)

$$V_u/V_o + M_u/M_o < 1 \quad (2)$$

- V_u : 終局伝達鉛直力 (N)
- M_u : 終局伝達節点モーメント (N・mm)
- V_o : 鉛直力のみが伝達されるとき終局伝達鉛直力 (N)
- M_o : モーメントのみが伝達されるとき終局伝達モーメント (N・mm)

3.4 ハーフ PCa スラブの界面の開き

N-10 と N-11 の柱幅+スラブ厚内のハーフ PCa と後打ちコンクリート間の界面の開きを図-6 に示す。ハーフ PCa に梁主筋を内蔵していない N-11 ではハーフ PCa と後打ちコンクリートの界面が大きく開き、 $R=40 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に 4.0mm 程度であるのに対し、N-10 では界面の開きは最大で 0.1mm 程度であり、ほとんど開かなかった。N-10 では両者の一体性は機械式継手で連結された梁主

表-3 最大耐力一覧

記号	計算値		実験値	比較	破壊形式 F:スラブ曲げ破壊 FP:スラブ曲げ降伏後のパンチング破壊
	パンチング耐力 文献2)による	スラブ曲げ耐力 文献3)による	最大耐力		
	P_p kN	P_{mu} kN	Q_{smax} kN	Q_{smax}/P_{mu}	
N-8	179	139	147	1.06	F
N-9	204	158	163	1.03	
N-10	177	130	133	1.03	
N-11	107	108	112	1.04	FP
N-12	98	87	98	1.12	
N-13	98	87	99	1.13	
G-2	124	124	118	0.95	F
T-1	129	62	83	1.33	

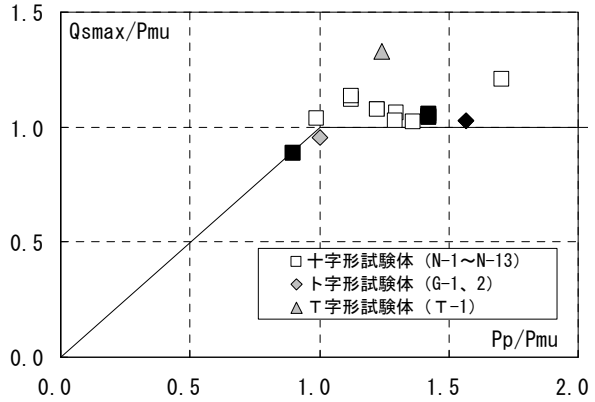
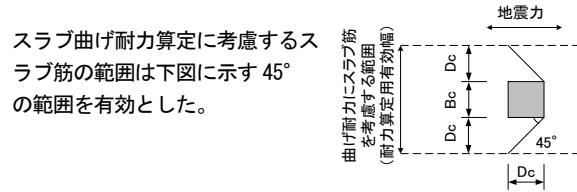


図-5 $Q_{smax}/P_{mu}-P_p/P_{mu}$ 関係

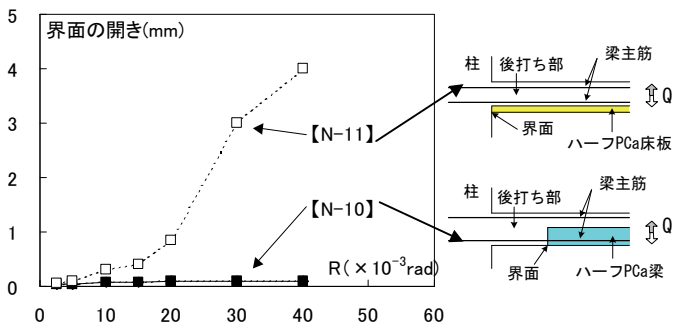


図-6 ハーフ PCa の界面の開き

筋によって良好に保たれていたと考えられる。

3.5 梁主筋、スラブ筋のひずみ分布

試験体 N-8 と N-9 の $R=40 \times 10^{-3} \text{rad}$ までの正載荷時ピークにおけるスラブ中央部とスラブ端部における加力方向のひずみ分布および危険断面位置のスラブ幅方向のひずみ分布を図-7 に示す。N-8 と N-9 を比較すると、

N-8のスラブ中央部では、 $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に降伏ひずみに到達しているが、これに対してN-9では、降伏ひずみに到達したのは $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$ であった。またN-8のスラブ端部において、 $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に全測定点のひずみがほぼ降伏ひずみに到達しているのに対し、N-9では全測定点がほぼ降伏ひずみに達したのは $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時であった。

3.6 パンチング補強筋、せん断補強筋のひずみ分布

N-8~N-10の最終変形時($R=100 \times 10^{-3} \text{rad}$)におけるパンチング補強筋およびせん断補強筋ひずみ測定位置でのひずみ分布を図-8に示す。同図では、ひずみ測定値が 1.0×10^{-3} 以下の補強筋位置を●、 1.0×10^{-3} を上回る補強筋位置を△、降伏ひずみ ϵ_y を上回った補強筋位置を○でそれぞれ示している。最大耐力時および最終変形時ともに、N-8では柱の前面側の、N-9では柱の側面のパンチング補強筋とせん断補強筋ひずみが大きな値を示した。これは、N-8では柱前後面のフラットプレート梁の曲げ抵抗によって伝達されるモーメントが、N-9では柱両側面のねじり力によって伝達されるモーメントが、他の試験体と比較して小さいためと考えられる。

4. まとめ

今回の実験によりフラットプレート構造において以下のことが確認できた。

- i. フラットプレート構造を主筋内蔵のハーフPCaとした場合、機械式継手で一体化することにより後打ち部との開きもほとんど無く、耐力低下もみられなかった
- ii. 鉛直荷重と水平荷重を同時に受ける場合でも、接合部周りを補強することにより十分な変形性能が得られた
- iii. 側柱を対象としたト字形試験体や最上階を対象としたT字形試験体において、急激な耐力低下はみられなかった

5. あとがき

フラットプレート構造においてスラブをPCa化した場合や鉛直荷重と水平荷重を同時に受ける場合、およびト字形やT字形に用いた場合の特性が把握できた。今後はこれらの知見を基に設計法を確立していきたい。

【参考文献】

- 1) 岸本剛他、「柱とスラブからなるフラットプレート架構の構造性能 その1」、奥村組技術研究年報、No. 32、pp.43-48、2006.7
- 2) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」、1999

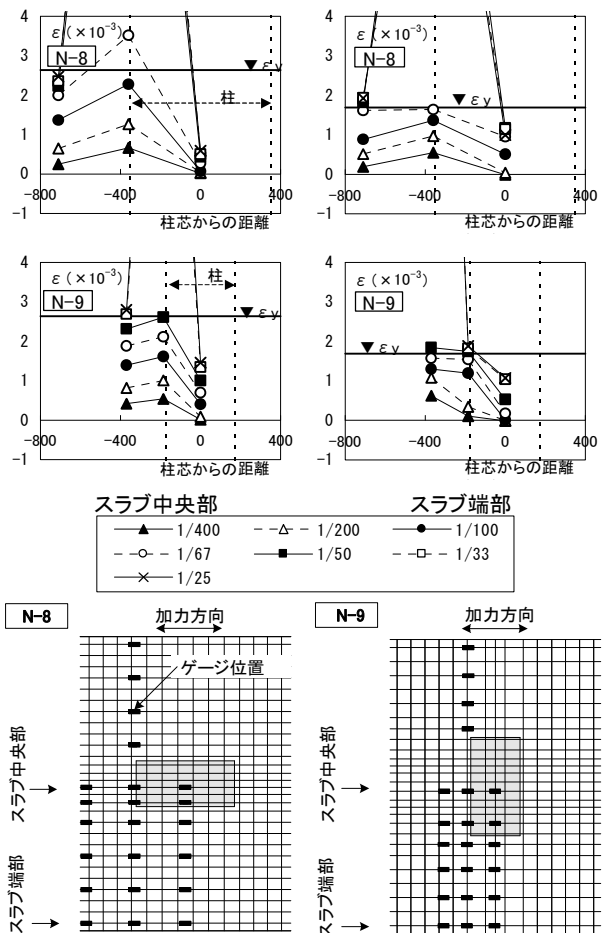


図-7 梁主筋、スラブ筋のひずみ分布

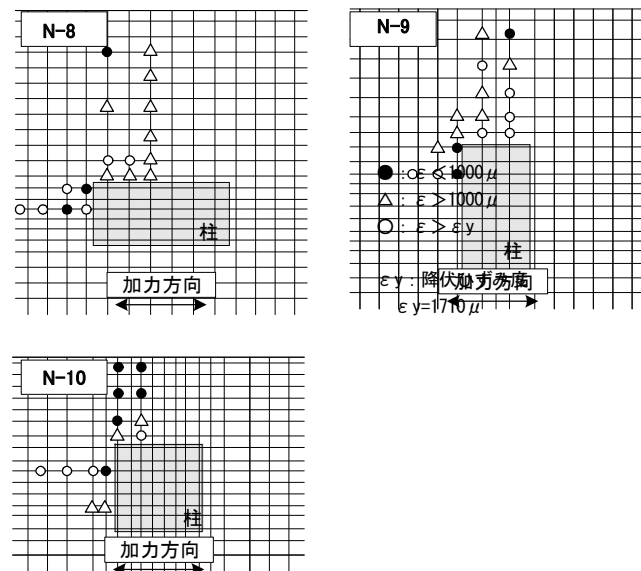


図-8 パンチング補強筋、せん断補強筋のひずみ分布