

論文 ポリプロピレン繊維補強コンクリートを用いた鉄骨間柱の簡易柱脚固定工法

森 浩二*1・船倉 一将*2・佐藤 裕一*3・金子 佳生*4

要旨: ALC パネル帳壁を固定する鉄骨間柱は風荷重を負担し、柱脚はせん断力が卓越する。柱脚を床スラブコンクリートに埋込み、床スラブコンクリートの支圧抵抗機構により風荷重を負担する構造の簡易柱脚固定工法について、ベースプレートとアンカーを用いた通常工法、および床スラブにポリプロピレン繊維補強コンクリートを使用した場合との比較実験を行った。実験の結果、通常工法と比較して柱脚の曲げ剛性がやや低いものの、間柱鉄骨の曲げ降伏時においても脆性的な破壊を生じていないこと、ポリプロピレン繊維補強コンクリートはひび割れ幅の拡大を抑制し、柱脚曲げ剛性の低下を抑制する効果があることを確認した。

キーワード: ダウエル筋, アンカー, 支圧抵抗機構

1. はじめに

鉄骨造建物の外壁を ALC パネル帳壁などで構築する場合、H 鋼間柱を介して ALC パネルを上下の梁に接合する形式がよく採用される¹⁾。1 階が鉄筋コンクリートの基礎梁や床スラブである場合には、一般の露出柱脚と同様にベースプレートとアンカーによって接合されるが、美観のためアンカーとベースプレートを床スラブコンクリートに埋め込む場合が少なくない²⁾。露出柱脚のベースプレートを床スラブコンクリートに埋め込んだ場合、埋込み式柱脚におけるコンクリートの支圧抵抗³⁾と同様の効果が期待される一方で、ベースプレートの浮き上がりによるかぶりコンクリートのパンチング破壊が指摘されている^{2),4)}。また、コンクリートによる露出柱脚の補強方法として、繊維補強セメント系複合材料による鉄骨柱脚構造の簡易化⁵⁾や、スチールチップ補強セメント系複合材料による耐震補強の試み⁶⁾が行われている。

これらは地震力を負担する柱を対象としており、柱脚を固定として曲げモーメントに対して抵抗する。一方で、間柱が負担する荷重は主として風荷重であり、間柱上下端をピンと仮定すると柱脚にはせん断力のみが作用する。

本論では、柱脚コンクリートの支圧抵抗機構によって

せん断力を負担する簡易間柱柱脚工法⁷⁾を対象として、せん断力が卓越する条件下での検証実験を行い、さらに床スラブにポリプロピレン繊維補強コンクリートを使用して損傷の抑制と強度の向上を図った結果について報告する。また、地震時における建物の変形による強制変位を想定し、弱軸方向の曲げ性能についても実験を行った。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体の一覧を表-1 に、代表的な試験体の柱脚部詳細を図-1 に示す。試験体 No.1~5 は、風荷重などの外力を受ける間柱(図-2(a))を想定し、間柱の中央に集中荷重を与える形式の载荷、試験体 No.6 は、地震時に強制変位を受ける間柱を想定し、鉄骨柱脚の曲げに対する変形性能を確認するため、基礎梁部のみを固定とした片持ち梁形式の载荷とした。

試験体 No.1 は通常工法による間柱柱脚で、基礎梁に定着した建て込み用アンカーにベースプレートを介して柱脚を固定する構造で、ベースプレートは後打ちする床スラブに埋め込まれる。試験体 No.2~5 は簡易間柱柱脚で、柱脚は基礎梁に定着させず、間柱のウェブを貫通するダ

表-1 試験体一覧

No.	形式	床スラブ	間柱	埋め込み長さ (mm)	载荷形式	载荷方向
1	アンカー	普通	H-250x125x6x9	200	両端支持	強軸
2						
3		PP 繊維				
4	ダウエル筋	普通	H-250x250x9x14	150	片持ち梁	弱軸
5						
6			H-250x125x6x9	200		

*1 京都大学大学院 工学研究科博士課程 (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科修士課程 (学生会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科助教 博士 (工学) (正会員)

*4 京都大学工学院 工学研究科教授 Ph. D. (正会員)

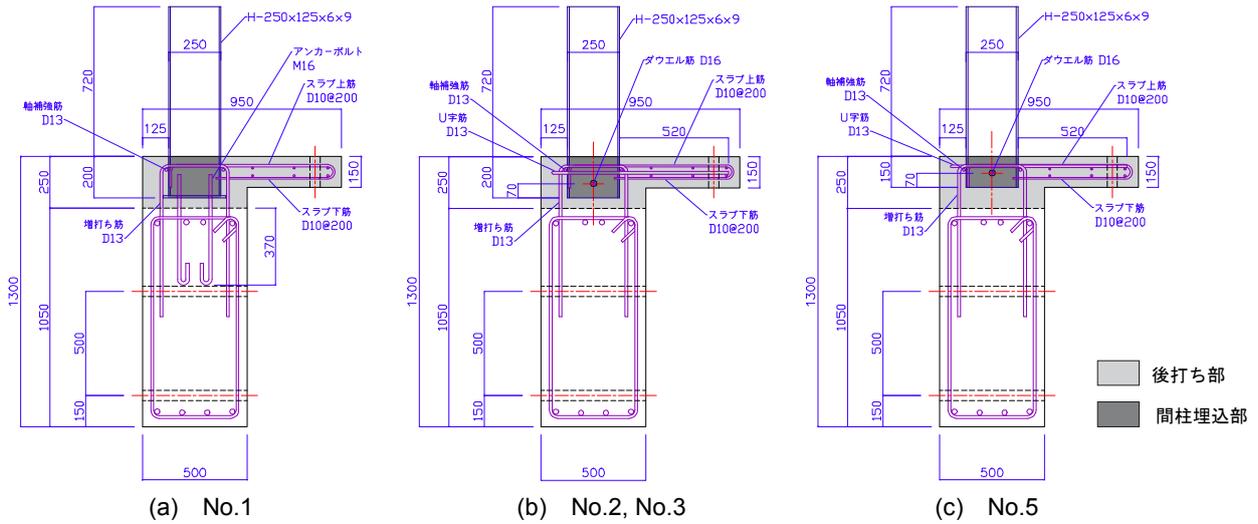


図-1 試験体図

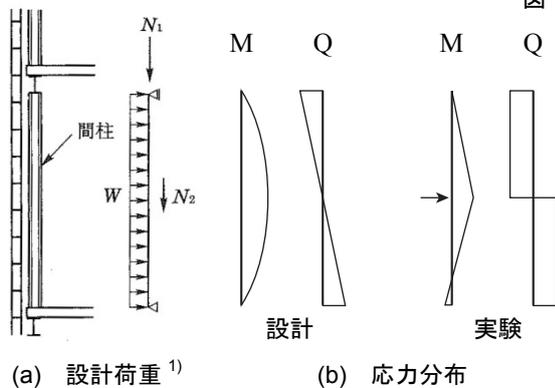


図-2 荷重条件

ウエル筋で床スラブコンクリートに定着させる構造である。なお、床スラブコンクリートの側方破壊防止のため、柱脚を囲む U 字筋を床スラブに定着させている。No.2 と No.3 の形状は同一で、No.3 は後打ちの床スラブ部分にポリプロピレン繊維補強コンクリートを使用した試験体、No.4 は間柱を広幅の H 鋼とした試験体、No.5 は間柱柱脚の埋込み長さを 150mm と短くした試験体である。No.6 は弱軸方向に荷重する試験体で、No.2 を 90° 回転させたディテールとなっている。

2.2 荷重装置

荷重装置を図-3 に示す。図中左側の柱脚と右側の柱頭を固定し、図中の上方向を正側として間柱の中央を 1000kN 油圧ジャッキにより静的に正負交番荷重を行った。間柱の支点間距離（床コンクリートの上端から間柱上端支点までの距離）は 3200mm である。間柱上端はガセットプレートを介したボルト接合で、高力ボルト 1 本あたりの導入軸力を 117kN、摩擦係数を 0.45 と仮定した場合の柱頭接合部すべり時の回転モーメントは約 2.8kNm となり、間柱の曲げ降伏時にはほぼピンとみなせる。設計時と実験時に想定される応力分布を図-2(b)に示す。荷重制御は、間柱の上下端をピンと仮定した場合に中央が降伏する時の荷重 P_y に対して、 $P_y/3$, $2P_y/3$ を正負

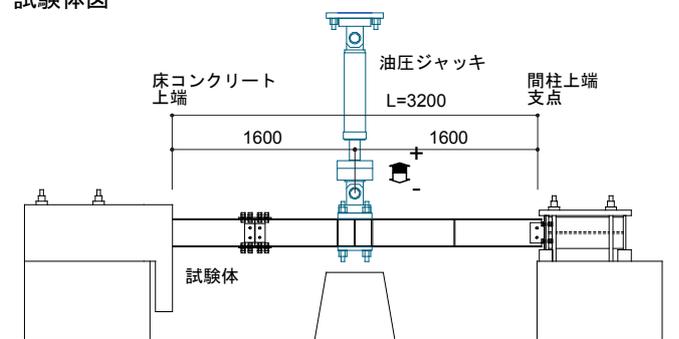


図-3 荷重形式

3 回、その後、間柱の支点間距離 L に対する部材中央変位 δ の比を基準として $\delta/L=1/400$, $1/200$, $1/100$ について、正負各 3 回の繰返し荷重を行った。

試験体 No.6 については柱頭を接合せず片持ち梁形式の荷重とし、部材角 $\theta = \delta/(L/2)$ を基準として $1/400$, $1/200$, $1/100$, $1/50$ のそれぞれについて正負各 3 回の繰返し荷重を行った。

2.3 材料

コンクリートの調合を表-2 に、ポリプロピレン短繊維の諸元を表-3 に示す。試験体の地中梁は呼び強度 24 の普通コンクリート (F) とし、床スラブは呼び強度 18 の普通コンクリート (N) を使用した。ただし、試験体 No.3 の床スラブは呼び強度 18 の普通コンクリートにポリプロピレン短繊維を外割で 0.4vol.% 混入した (PP)。混入率はポリプロピレン短繊維を床スラブに使用する場合の標準混入率を基準としている。ポリプロピレン短繊維の混入は、計量した生コンクリートとポリプロピレン短繊維をポットミキサーに投入し、60 秒間攪拌を行う方法で行った。

表-4 にコンクリート材料試験結果、鉄筋および鉄骨試験片の引張試験結果を示す。ポリプロピレン繊維混入の有無による圧縮強度 σ_B および割裂強度 σ_t の有意差は見られない。圧縮強度時ひずみ ϵ_u はポリプロピレン繊維

表-2 コンクリート調合

	繊維 (Vol.%)	W/C (%)	S/a (%)	W	C	S	G	SP/C (%)
				(kg/m ³)				
F	—	57	45	183	321	771	869	1.0
N		68	47	196	288	810	945	1.0
PP	0.4							

表-3 繊維諸元

	繊維長 (mm)	密度 (g/cm ³)	繊維径 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	断面形状	表面形状
PP	30	0.91	0.7	500	矩形	エンボス

表-4 材料試験結果

(a) コンクリート

	σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	ϵ_u ($\times 10^{-3}$)	E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)
F	41.9	3.68	2.09	3.16
N	31.9	2.95	2.04	2.84
PP	31.9	2.96	2.16	2.66

F: 基礎梁, N: 床スラブ, PP: 床スラブ(No.3)

(b) 鉄筋

	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_s ($\times 10^5$ N/mm ²)
D10	368	509	1.80
D13	357	493	1.75
D16	337	483	1.85
D19	379	549	1.85
M16	402	568	2.50

D10: スラブ筋, D13: 増打ち・軸補強筋, U字筋, D16: ダウエル筋, D19: ダウエル筋 (No.4), M16: アンカー

(c) 鉄骨

	部位	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_s ($\times 10^5$ N/mm ²)
H-250x125	W	321	453	2.05
	F	311	447	2.03
H-250x250	W	341	477	1.87
	F	306	471	2.10

W: ウェブ, F: フランジ

補強コンクリートがやや大きく、弾性係数 E_c は低くなっている。

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形関係を図-4に示す。試験体 No.4 では荷重が 300kN を超えたあたりから鉄骨を接合しているスプライスプレートにすべりが発生し、不安定な挙動が生じたため、最終荷重サイクルは正負 1 回のみの荷重

として実験を中断した。

両端支持強軸載荷の試験体 (No.1~5) では、いずれも中央たわみが 16mm を超えたあたりから剛性が大きく低下しているが、耐力が低下することなく、変形とともに緩やかに荷重は増大している。間柱中央の鉄骨には残留変形が見られ、鉄骨が曲げ降伏していたと考えられる。

柱脚の仕様の異なる No.1 と No.2 を比較すると、たわみ 8mm (1/400) の時点での No.2 の負側剛性が No.1 に比べ 8.5%低くなっていた。変形の大きいたわみ 16mm (1/200) 以降では正側載荷においても No.2 の剛性低下が No.1 より大きくなっていることが確認できる。

片持ち梁形式弱軸載荷の試験体 No.6 の荷重-変形関係は、ほぼ線形の履歴曲線であり、鉄骨の弾性変形が支配的となった。

3.2 ひび割れ状況

試験体 No.1~5 のたわみ 1/200 時のひび割れ状況、および No.6 の変形角 1/50 時のひび割れ状況を図-5に示す。両端支持載荷の試験体 No.1~5 では鉄骨フランジ端から 45° 方向に伸びるせん断ひび割れが発生した。アンカー形式の試験体 No.1 ではたわみ 1/400 の時点でせん断ひび割れが生じ、その後 1/200 以降でせん断ひび割れが拡大した。ダウエル筋形式の試験体 No.2~5 では No.1 よりも早期にせん断ひび割れが生じており、特に埋め込み長さの短い No.5 や広幅鉄骨試験体 No.4 では降伏荷重 P_y の 1/3 の段階でひび割れが発生している。

最終段階では、アンカー形式の No.1 の試験体は他の試験体よりせん断ひび割れが少なかったが、地中梁と床スラブの打ち継ぎ面に幅 3mm 程度の曲げひび割れが生じていた。普通コンクリート試験体の No.2 とポリプロピレン補強コンクリート試験体の No.3 を比較すると、No.2 ではひび割れが長く、No.3 では比較的短めのひび割れが多数発生するといった違いが見られた。

片持ち梁載荷の試験体 No.6 ではフランジ端部に短いせん断ひび割れが発生し、鉄骨周辺とコンクリートとの間に若干の剥離が見られたものの、変形角 1/50 までほとんどひび割れは生じなかった。

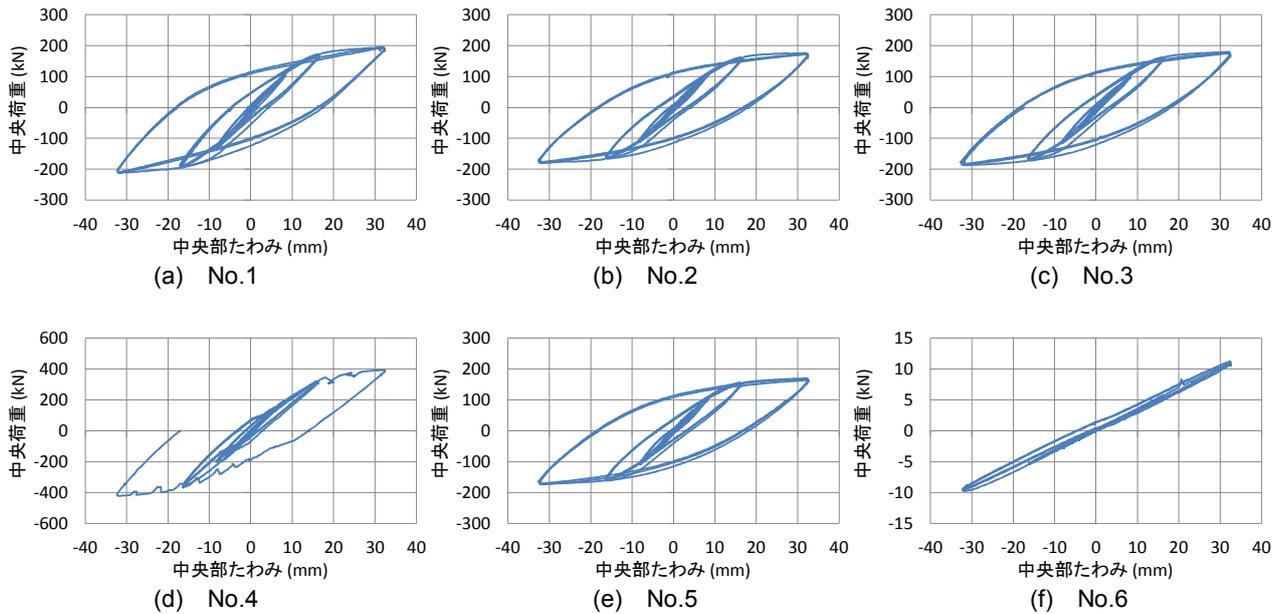
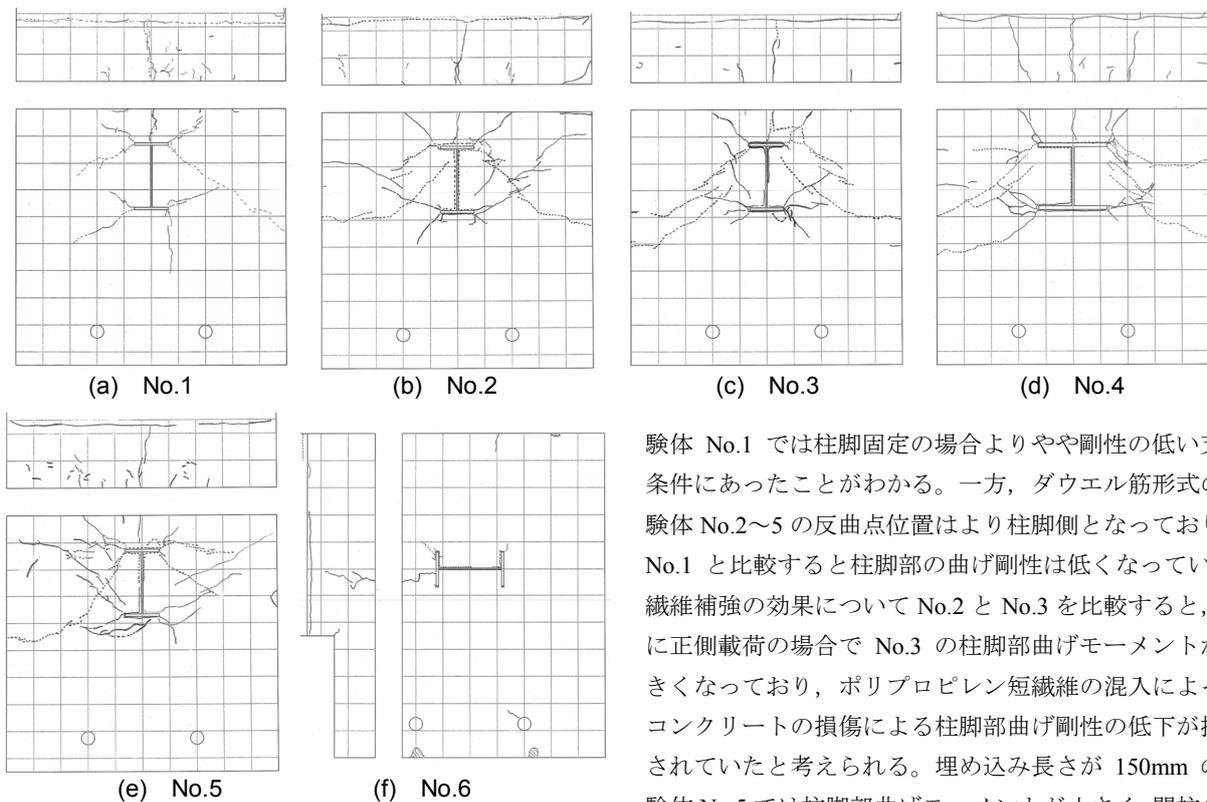


図-4 荷重-変形関係



No.1~5 : たわみ 1/200 時, No.6 : 部材角 1/50 時

図-5 ひび割れ状況

3.3 曲げモーメント分布

両端支持の試験体 No.1~5 について、各载荷サイクル毎の鉄骨曲げモーメント分布を図-5 に示す。鉄骨の曲げモーメントはフランジのひずみから算出した。図中、横軸は間柱鉄骨の位置を表し、原点が床スラブコンクリート表面、正側が载荷点側である。

柱頭ピン・柱脚固定・中央载荷の場合に想定される反曲点位置は柱脚から 873mm であり、アンカー形式の試

験体 No.1 では柱脚固定の場合よりやや剛性の低い支持条件にあったことがわかる。一方、ダウエル筋形式の試験体 No.2~5 の反曲点位置はより柱脚側となっており、No.1 と比較すると柱脚部の曲げ剛性は低くなっている。繊維補強の効果について No.2 と No.3 を比較すると、特に正側载荷の場合で No.3 の柱脚部曲げモーメントが大きくなっており、ポリプロピレン短繊維の混入によってコンクリートの損傷による柱脚部曲げ剛性の低下が抑制されていたと考えられる。埋め込み長さが 150mm の試験体 No.5 では柱脚部曲げモーメントが小さく、間柱の反曲点が柱脚側となっている。広幅鉄骨の試験体 No.4 では柱脚部曲げモーメントは No.2 より大きくなっているが、間柱の反曲点位置はより柱脚側となっており、間柱の曲げ剛性に対して柱脚の剛性が低いと言える。

4. 考察

4.1 耐力評価

埋込み柱脚の抵抗機構^{8),9)}は図-7 に示すように、柱脚の曲げとせん断に対してコンクリートの支圧が抵抗する機構で、柱脚降伏時の耐力は式(1)となる。

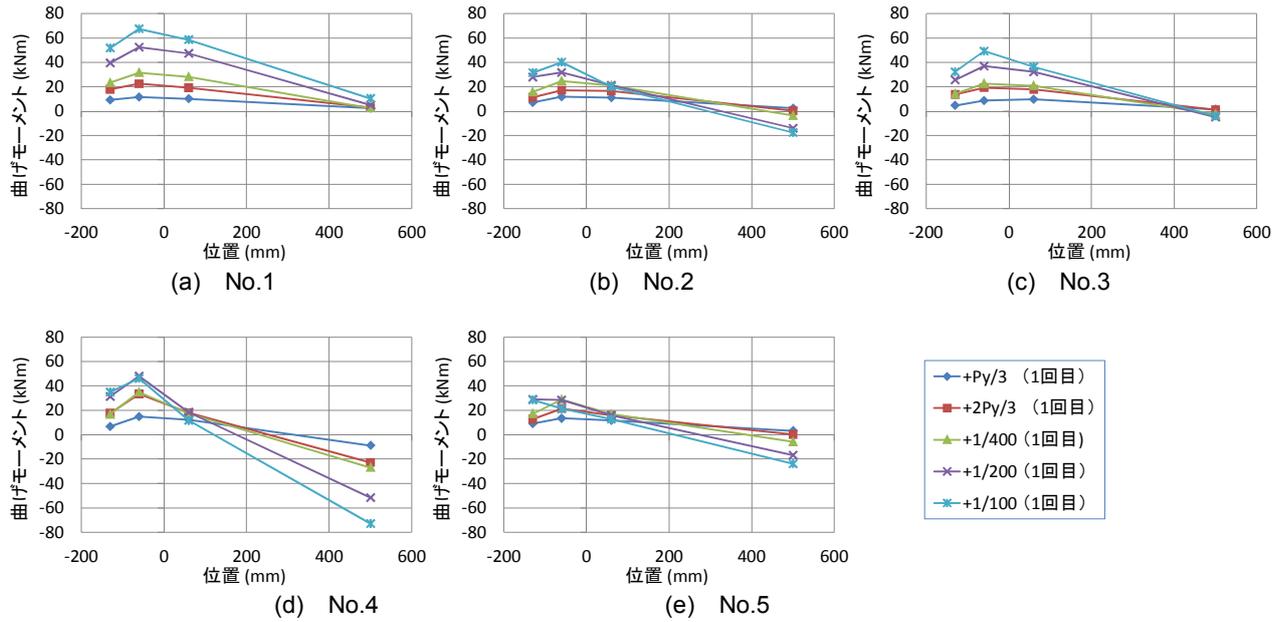


図-6 曲げモーメント分布

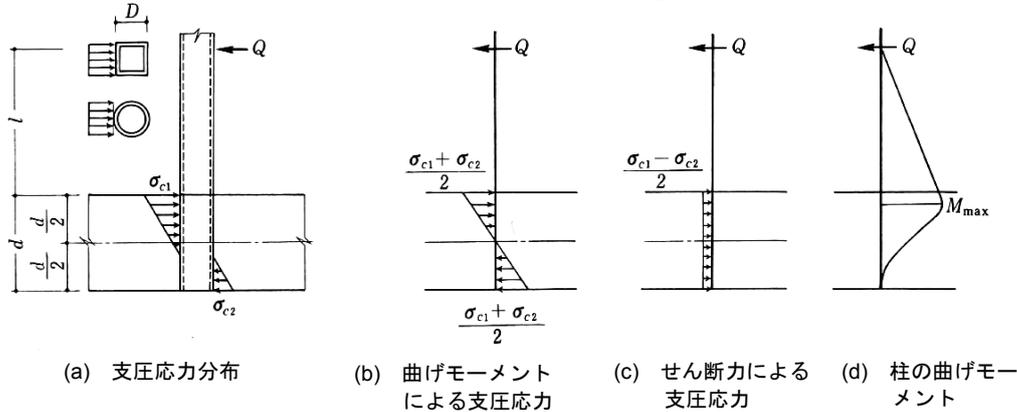


図-7 埋込み柱脚の抵抗機構⁹⁾

$$M_y = \frac{F_{cy} \cdot B_c \cdot l \cdot d^2}{2(3l + 2d)} \quad (1)$$

$$Q_y = \frac{M_y}{l} \quad (2)$$

ここに、 M_y ：埋込み式柱脚の基礎梁上端における降伏曲げ耐力、 Q_y ：降伏曲げ耐力時の柱せん断力、 B_c ：柱幅、 d ：埋込み深さ、 l ：基礎コンクリート上端から柱の反曲点までの高さ、 F_{cy} ：基礎コンクリートの降伏支圧強度 ($=2/3 F_c$)、 F_c ：基礎コンクリートの設計基準強度

本実験について、埋込み柱脚と同様の仮定を用いると式(3)が得られる。

$$Q_y = \frac{F_{cy} \cdot B_c \cdot d^2}{2(3M/Q + 2d)} \quad (3)$$

ここに、 M/Q ：基礎コンクリート上端における柱の曲げモーメントとせん断力の比

式(3)より得られる柱脚せん断力をコンクリートの支

表-5 耐力評価式との比較

	実験値	柱脚固定		柱脚ピン	
	P_{200} (kN)	P_{200} / P_{cy}	P_{200} / P_{sy}	P_{200} / P_{cy}	P_{200} / P_{sy}
No.1	170	4.41	1.03	0.43	2.75
No.2	157	4.09	0.96	0.39	2.55
No.3	159	4.14	0.97	0.40	2.58
No.4	315	4.10	0.72	0.40	1.92
No.5	148	6.63	0.90	0.50	2.41

圧破壊時せん断力とし、柱脚固定と仮定した場合、ピンと仮定した場合それぞれについて間柱の中央荷重 (P_{cy}) を求めた結果を表-5、図-8に示す。図の横軸は間柱の長さとし、間柱の鉄骨が曲げ降伏する場合の中央荷重 (P_{sy}) と、間柱中央のたわみ $1/200$ ($\delta=16\text{mm}$) 時の試験体の荷重 (P_{200}) を示した。算定にあたって、コンクリートの降伏支圧強度 F_{cy} には材料試験時の圧縮強度 σ_B を用い、鋼材の降伏強度は材料試験結果によった。

コンクリートの支圧破壊時の計算値は柱脚固定の場合

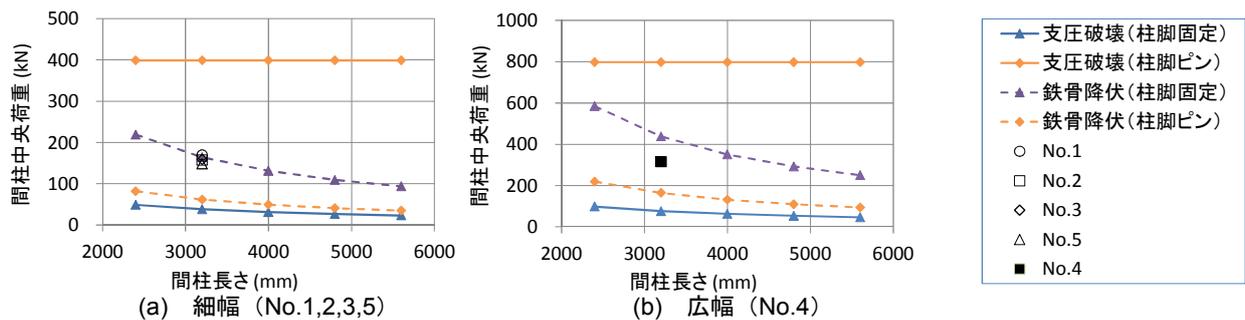


図-8 耐力評価式との比較

合とピンの場合とで大きく異なり、柱脚固定の場合は支圧破壊が先行し、ピンの場合は鉄骨の曲げ降伏が先行する。実験値は、細幅の場合、いずれの試験体も柱脚固定と仮定した場合の鉄骨曲げ降伏時の強度に近く、実験値との比は No.1 で 1.03, No.2, 3 はそれぞれ 0.96, 0.97, No.5 で 0.90 となった。荷重-変形関係の剛性低下も 1/200 付近で生じており、柱脚の固定度により若干の低下はあるものの、間柱全体の応力分布は柱脚固定に近いモードとなっていたと考えられる。一方、広幅の試験体 No.4 では、柱脚固定と仮定した場合の鉄骨曲げ降伏時の強度 (P_{sy}) に対する実験値 (P_{200}) の比率は 0.72 とやや低い値となった。

間柱の設計で通常採用される両端ピン支持の場合の鉄骨曲げ降伏時せん断力に対する比率は、細幅の場合で 2.4~2.8, 広幅の場合で 1.9 であり、設計荷重に対し十分な安全率を有しているといえる。

5. まとめ

鉄骨間柱を床スラブコンクリートにダウエル筋で定着する工法について、柱頭および柱脚を固定し、両端支持の条件で間柱中央に強軸方向の横力を加える方法での実験と、柱脚のみを固定した片持ち梁形式の条件で弱軸方向の変形を与える実験を行った。実験の結果、以下の知見を得た。

- (1) ダウエル筋で定着した柱脚は、アンカーで定着した場合と比べて柱脚の曲げ剛性がやや低いが、間柱の曲げ降伏時せん断力以上のせん断耐力を有する。
- (2) ポリプロピレン繊維補強コンクリートを用いた試験体では、普通コンクリートを用いた同型の試験体に比べ、床スラブコンクリートのひび割れが減少し、柱脚曲げ剛性の低下が小さくなった。
- (3) 柱脚の埋め込み深さが浅い場合には、柱脚曲げ剛性がやや低く、床スラブコンクリートの損傷も大きくなる。
- (4) 間柱の弱軸方向に荷重を受ける場合には、間柱自体の剛性が低いため床スラブに作用する荷重は小さく、コンクリートはほとんど損傷しない。

- (5) 試験体の、柱脚をピンとして設計した場合の設計荷重に対する安全率は、細幅の場合で 2.4~2.8, 広幅の場合で 1.9 となった。

謝辞

本実験で使用したポリプロピレン短繊維は萩原工業株式会社より提供いただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 (JASS 21 2005) ALC パネル工事, 2005
- 2) 山本遼太, 倉田真宏, 長江拓也, 寺田岳彦, 吹田啓一郎, 中島正愛：繰返し載荷実験と最大耐力評価法, 浅い埋込み柱脚の弾塑性挙動と保有性能その 1, 日本建築学会構造系論文集, Vol.72, No.613, pp.147-153, 2007.5
- 3) 森田耕次, 加藤勉, 田中淳夫, 藤田典正：埋込み形式柱脚の最大耐力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.347, pp.65-74, 1985.1
- 4) 植村具民, 山本遼太, 長江拓也, 寺田岳彦, 吹田啓一郎, 中島正愛：鉄筋補強柱脚実験と塑性変形能力, 浅い埋込み柱脚の弾塑性挙動と保有性能その 2, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.623, pp.111-117, 2008.1.
- 5) 金子佳生, 三橋博三, 大作亮平：鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鋼構造柱脚とその変形特性, せん断破壊力学モデルを用いた接合部の変形評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.71, No.609, pp.181-188, 2006.11
- 6) 金田学, 佐藤裕一, 金子佳生：スチールチップ補強セメント系複合材料による露出柱脚の耐震補強, 鋼構造年次論文報告集, Vol.19, pp.155-162, 2011
- 7) 山口克彦, 佐藤尚隆, 飛田喜則：簡易間柱柱脚工法の開発研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1149-1150, 2016.8
- 8) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, 2012
- 9) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説, 1990