

(13) SRC造の実大十字型骨組の弾塑性挙動

ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF COMPOSITE FULL SCALE INTERIOR SUBASSEMBLAGES.

栗原 雅之^{*1} 野口 隆^{*1} 鈴木 信治^{*1}
Masayuki KURIHARA Takashi NOGUCHI Shinji SUZUKI

西村 泰志^{*2} 南 宏一^{*3} 福知 保長^{*4}
Yasushi NISHIMURA Koichi MINAMI Yasunaga FUKUCHI

On proceeding the construction of SRC structures, the working procedure can be symplified and economized by the utilization of precasted memberes. When we use precasted concrete members, the problem would be the joint between precasted concrete and the in-site-concrete. How will it affect the strength and the deformation of the frame? On this experiment, we have assumed a model having the PC structure under the beams and slab. And in order to grasp the actual performance of the members, we have prepared the full scaled beam-column test specimens. This report is to make clear the effects of concrete joint to the structual strength of the frame and analize whether yield calculation formula in hand is reasonable.

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRC）造の高層建築物の施工に際し、構造部材のプレキャスト化（以下PC化）を行うことによって、施工の省力化及び能率化を計ることができる。PC化を行うことによってPCコンクリートと現場打ちコンクリートとの打ち継ぎが、骨組の耐力や変形性能にどのような影響を与えるかが問題となる。本報は梁及びスラブの一部をPC化する構法を想定し実際の構造物の部材の挙動を把握するため、コンクリートの打ち継ぎが骨組の構造性能に及ぼす影響を、実大の柱梁骨組試験体によって実験的に明らかにする。さらに既往の耐力式が実大実験の結果に対して妥当であるかを検討する。

2. PC化構法

PC化の方法については、梁をPC化し、柱及びスラブのコンクリートを一体打ちとするもの、柱梁接合部を中心に十字型のPC化を行い柱梁の中央で接合するものなど種々の構法がある。ここでは図-1に示すように、直行方向に長短異なる梁を有する十字型鉄骨鉄筋部材の長い方の梁をPC化し、柱梁部材を交互に

*1 (株) 青木建設 技術本部

*2 大阪工業大学工学部建築学科講師

*3 工博 大阪工業大学工学部建築学科助教授

*4 工博 名古屋工業大学社会開発工学科教授

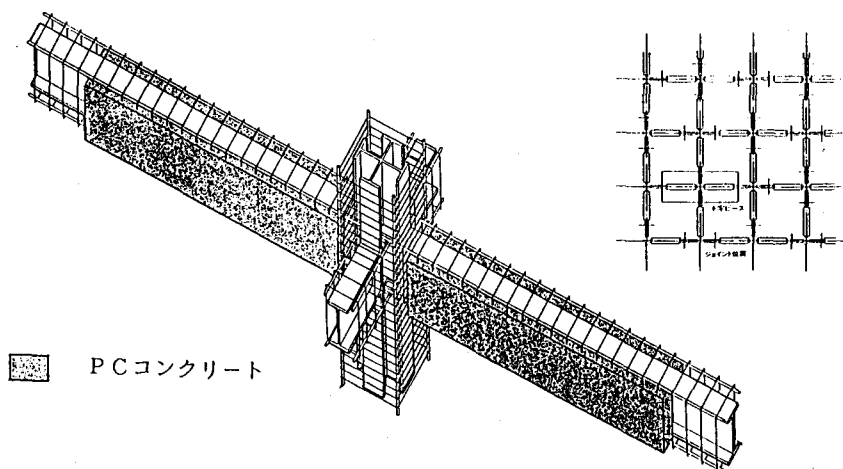


図-1 PC構法の概要

連結し、残りのコンクリートを現場で打設することによって一体化する構法を想定する。なお、試設計モデルとして、地上30階、階高2.85~2.95 m、基準階の平面はX方向5スパン(スパン長さ4.5~5.7 m) Y方向スパン(スパン長さ6 m)の集合住宅を想定している。

3. 実験計画

試験体は、試設計モデルの柱・梁反曲点から取り出した実大十字型骨組みである。梁及びスラブ下部のPC化によって鉄骨・鉄筋の接続、コンクリートの打ち継ぎが生じるが、本実験では主にコンクリートの打ち継ぎの影響を調べるのが目的であるので鉄骨には継ぎ手を設けていない。試験体は、A、Bシリーズからなり、Aシリーズは、梁が矩形断面からなる柱梁骨組みで、Bシリーズは梁がスラブを有するT型断面からなる柱梁骨組みで直交梁を有している。表-1に試験体の一覧を示す。各試験体における調査項目は次のとおりである。A-2は、梁のスラブ下部分をPC化し、柱面から3 cm入ったところでコンクリートを打ち継ぐもので、水平・垂直のコンクリート打ち継ぎの影響を調べる。A-3は梁のスラブ下部分をPC化したもので、梁中央部でコンクリートを打ち継いだ時の影響を調べる。また梁主筋は機械式継手にて接続され継ぎ手の影響を調べる。A-1は、A-2、A-3と比較するために柱梁のコンクリートを一体打ちとしたものである。B-2は、スラブ下部に工場生産のPC板を使用し梁面から3 cm入ったところでコンクリートを打ち継ぐもので、主にスラブ内の水平打ち継ぎの影響を調べる。B-3は、梁のスラブ下部分、スラブの下部を別々にPC化し、柱面から3 cmのところでコンクリート打ち継ぎを有するもので、スラブを含めた水平、垂直の打ち継ぎの影響を調べる。B-1はB-2、B-3と比較するため

表-1 試験体一覧

Aシリーズ	Bシリーズ
A-1 	B-1
A-2 	B-2
A-3 	B-3
先打ちコンクリート 後打ちコンクリート	

表-1に試験体の一覧を示す。各試験体における調査項目は次のとおりである。A-2は、梁のスラブ下部分をPC化し、柱面から3 cm入ったところでコンクリートを打ち継ぐもので、水平・垂直のコンクリート打ち継ぎの影響を調べる。A-3は梁のスラブ下部分をPC化したもので、梁中央部でコンクリートを打ち継いだ時の影響を調べる。また梁主筋は機械式継手にて接続され継ぎ手の影響を調べる。A-1は、A-2、A-3と比較するために柱梁のコンクリートを一体打ちとしたものである。B-2は、スラブ下部に工場生産のPC板を使用し梁面から3 cm入ったところでコンクリートを打ち継ぐもので、主にスラブ内の水平打ち継ぎの影響を調べる。B-3は、梁のスラブ下部分、スラブの下部を別々にPC化し、柱面から3 cmのところでコンクリート打ち継ぎを有するもので、スラブを含めた水平、垂直の打ち継ぎの影響を調べる。B-1はB-2、B-3と比較するため

に、柱梁及びスラブのコンクリートを一体打ちとしたものである。表中の先打ちコンクリート及び後打ちコンクリートは想定した構法のPCコンクリート及び現場打ちコンクリートに対応する。

4. 試験体

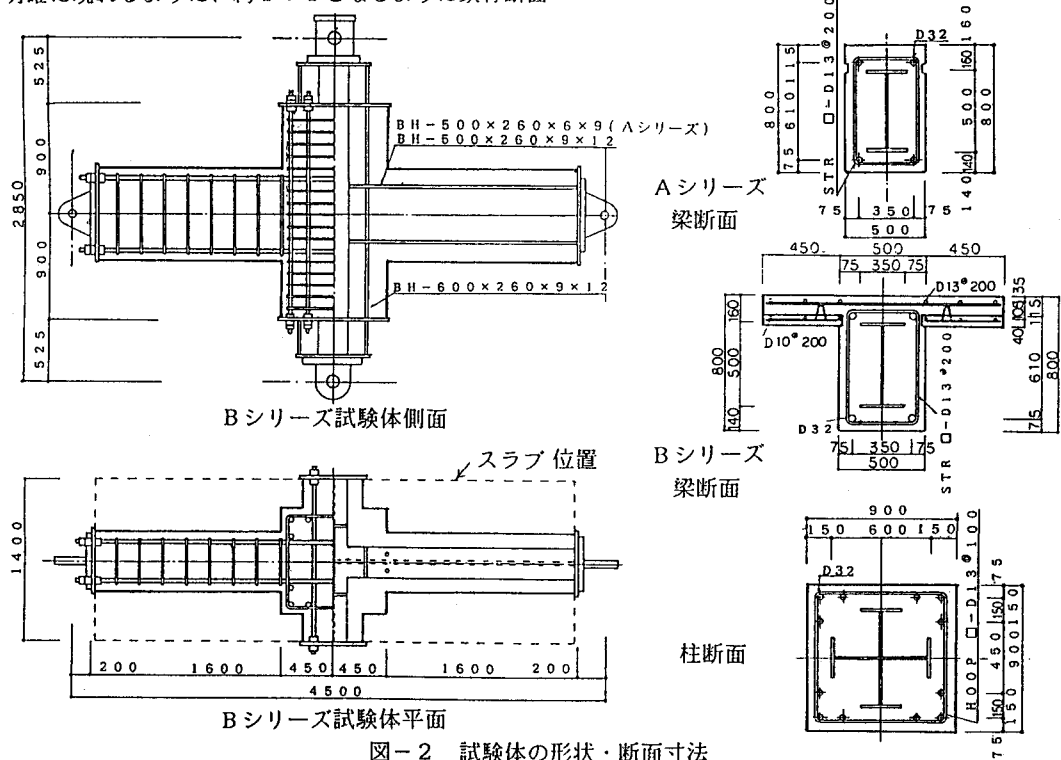
試験体の形状寸法、柱梁の断面寸法を図－2に示す。試験体は、交換可能な鉄骨の加力治具を柱及び梁の両端部に取り付け、所定の寸法となるように計画した。Aシリーズの梁は、スラブ下部にPCコンクリートを使用することを前提として、PCコンクリート板による断面欠損、(3cm×6cm)を設けてある。Bシリーズの梁はスラブ(スラブ厚t=18cm、スラブ有効幅ba=45cm)を有し、B-2、B-3は、その下側6cmを、PCコンクリートとしている。PCコンクリート部内の鉄筋は、柱内に定着していない。また、試設計モデルの鉄筋コンクリート(以下RC)部分と鉄骨(以下S)部分との曲げ耐力の負担の割合は、約1：3であるが実験ではRC部分の性状がより明確に現れるように、約1：1となるように鉄骨断面

表－2 材料の力学的性質
(a) コンクリート

試験体	先打ちコンクリート		後打ちコンクリート	
	F _c (kg/cm ²)	F _t (kg/cm ²)	F _c (kg/cm ²)	F _t (kg/cm ²)
A-1			314	29.4
A-2	278	26.4	328	31.0
A-3	278	27.0	267	24.0
B-1			329	29.4
B-2	282	26.6	313	26.0
B-3	283	26.0	336	30.4

(b) 鉄筋・鉄骨

種	別	σ _y (kg/cm ²)	σ _u (kg/cm ²)	ε _u (%)
鉄筋	D10 (SD30)	3500	5200	19
	D13 (SD30)	3400	4900	22
	D32 (SD40)	4500	6500	19
鉄骨	t=6mm (SM50)	4300	5700	23
	t=9mm (SM50)	4200	5800	24
	t=12mm (SM50)	3800	5600	27



図－2 試験体の形状・断面寸法

を設定した。試験体は鉄骨組立て後、柱、梁の配筋を行い、コンクリートを打設した。柱梁の鉄骨は、SM50材による溶接H型钢とし、鉄筋は、D10、D13はSD30、D32は、SD40を使用した。梁の上下鉄骨フランジには柱コンクリート面の位置に $\phi 21$ の空気穴を2コ設けている。コンクリートの打設は、先打ち部分は早強コンクリート、後打ち部分は、普通コンクリートを使用し、先打ち部分打設後10日間の養生期間を置いて、後打ち部分のコンクリートを打設した。なお、打設は立て打ちとした。使用した材料の力学的性質を表-2に示す。

5. 実験方法

図-3に加力装置を示す。試験体の柱脚は回転支点、梁の両端は移動支点とし、柱頭部に水平荷重を加へ、建物に水平力が作用した場合の応力状態を再現するものである。変位計により柱頭、柱脚の水平及び鉛直方向の変位、接合部の対角線方向の変形、梁の抜け出し量を測定した。梁の主筋、鉄骨フランジ及びスラブ筋にワイヤーストレンゲージを貼付して、それぞれの歪値を測定した。加力は、層間変位角で制御し、柱頭の押し引きジャッキを用いて正負繰り返し水平力を加えた。なお、軸力は作用させていない。載荷方法は、層間変位角 $R=0.01\text{rad}$, 0.02rad で正負2回の繰り返しを行った後、 $R=0.05\text{rad}$ まで載荷し実験を終了した。載荷プログラムを図-4に示す。

5. ひび割れ及び破壊状況

図-5に最終のひび割れ状況を示す。ひび割れ発生から破壊に至るまで、試験体による違いは見られなかった。ひび割れの発生過程は次のとおりである。Aシリーズでは、 $R=0.002\text{rad}$ 程度ではりの曲げひび割れが観察され、 $R=0.0033\text{rad}$ 程度で接合部のせん断ひび割れが観察された。 $R=\pm 0.01\text{rad}$ 1サイクル後では、各試験体共梁中央部から柱の方向にかけて、曲げ及び曲げせん断ひび割れが観察された。また、A-3では、梁中央部の垂直打継ぎ面に添ったひび割れが観察された。 $R=\pm 0.01\text{rad}$ 2サイクル後では、各試験体共梁及び接合部のひび割れの数も増加し、梁端部へひび割れが進展するのが観察された。特に、A-2では、梁中央部のひび割れの数が他の2体に比べて多い。 $R=\pm 0.02\text{rad}$ 1サイクル後では、ひび割れの数増加は少なくなり、ひび割れ巾が増大しているのが観察された。特に、梁の接合端から20cm以内の場

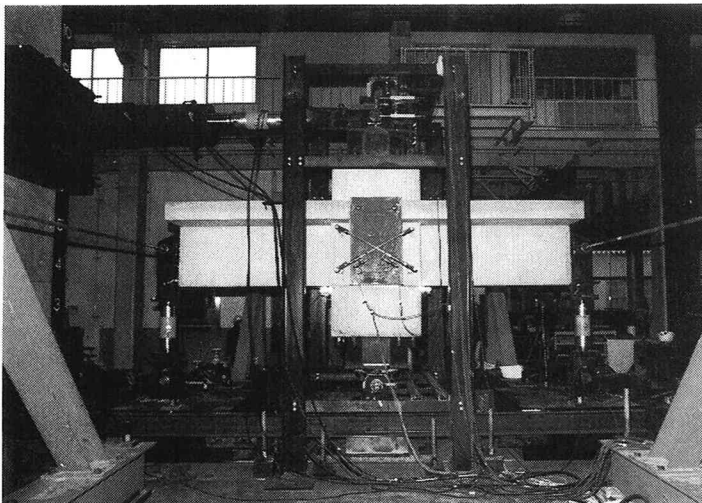


図-3 加力装置

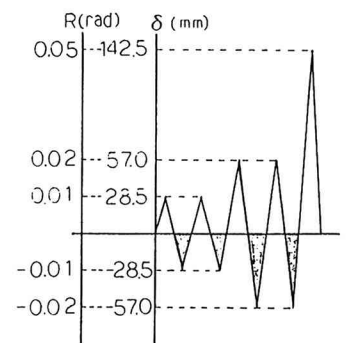


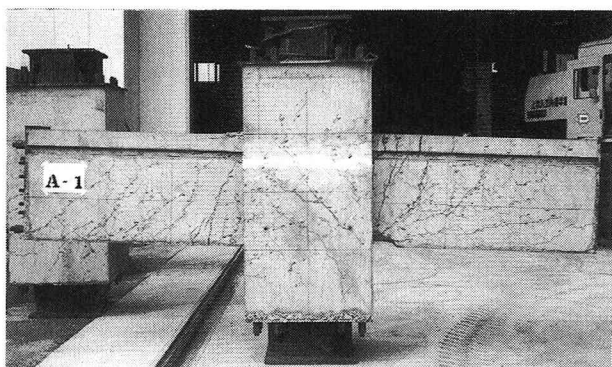
図-4 載荷プログラム

所でひび割れ巾の増大が著しい。また、梁の接合端で10mm前後の梁の抜け出しが観察された。 $R = \pm 0.02\text{rad}$ 2サイクル後では、さらにひび割れ巾が集中的に増大し、コンクリートの曲げ圧壊によるかぶりコンクリートの剥落が観察された。最終のひび割れ状況は、A-3で垂直打継ぎ面に若干のずれが生じていることを除いて、各試験体共、大きな違いは観察されなかった。Bシリーズでは、 $R = 0.002\text{rad}$ 程度で梁の曲げひび割れが観察され、 $R = 0.004\text{rad}$ 程度で接合部のせん断ひび割れが観察された。 $R = \pm 0.01\text{rad}$ 1サイクル後では、梁中央部から柱に向かい 45° 方向に曲げせん断ひび割れが観察された。 $R = \pm 0.01\text{rad}$ 2サイクル後では、1サイクルと同様の傾向でひび割れの発生が見られた。 $R = \pm 0.02\text{rad}$ 1サイクル後では、梁及び接合部にひび割れが発生し、梁端部へひび割れが進展するのが観察された。 $R = \pm 0.02\text{rad}$ 2サイクル後では、新たなひび割れの発生はなくなり、ひび割れ幅が増大し、特に梁部材接合端の柱から20cm以内の部分で著しく増大しているのが観察された。また、梁部材接合端で7mm前後の梁の抜け出し及びコンクリートの曲げ圧壊が観察された。 $R = 0.02 \sim 0.05$

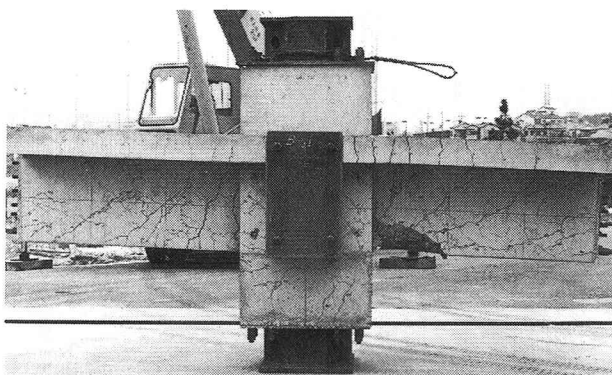
rad では、曲げ圧壊によるかぶりコンクリートの剥落が観察された。B-2及びB-3ではスラブの下部PC部分の柱へののみ込み部分に添ったひび割れが観察された。コンクリートの剥落部分はB-1が一番大きく、他の点では顕著な差は見られなかった。

6. 履歴曲線

図-6に各試験体の履歴曲線を示す。縦軸は、柱頭に加えられた水平荷重 P 、横軸は相対変位角 R である。図中の点線 P_u は、梁崩壊型を仮定して求められた骨組の終局耐力から求められた荷重である。梁の曲げ耐力は、建築学会SRC規準の一般化累加強度式によって算出した。点線 P_s は梁の短期許容曲げ耐力に相当する荷重である。また、図中の矢印は、表-3に示す各荷重である。各試験体とも、梁の曲げ降伏が先行し、層間変位角 $R = 0.05\text{rad}$ 程度の大変形時においても耐力低下の少ない安定した履歴性状を示した。Aシリーズの3体を比較するとA-2、A-3は、A-1と耐力は同等であるが、ループの性状がややスリップ型となっている。また、A-3の最大荷重の発生は他の2体よりも早く、 $R = 0.035\text{rad}$ 付近から耐力の低下が見られるが、これは、コンクリートの垂直打ち継ぎ面のずれによる影響と思われる。Bシリーズの3体では、 $R = \pm 0.01\text{rad}$, 2サイクル後までのループについては、B-2、B-3はB-1に比べスリップ型となっているが、全履歴としては、違いはないと言える。



(a) A-1 試験体



(b) B-1 試験体

図-5 ひび割れ状況

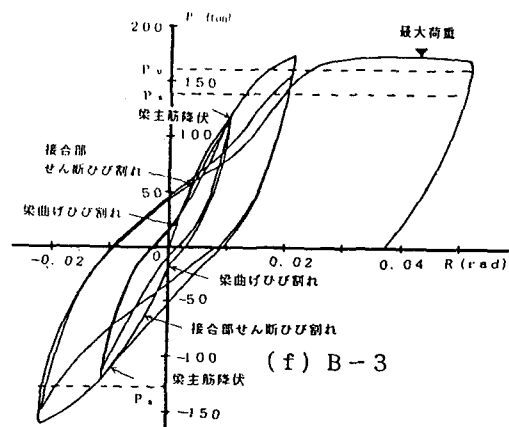
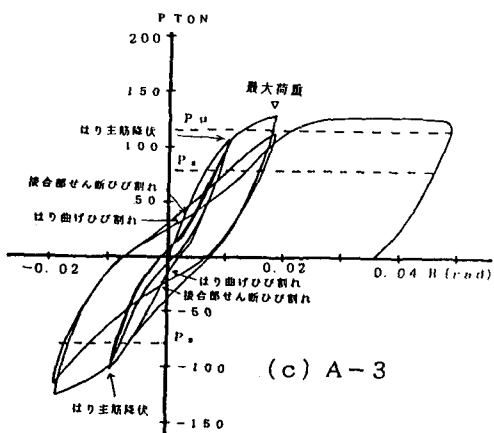
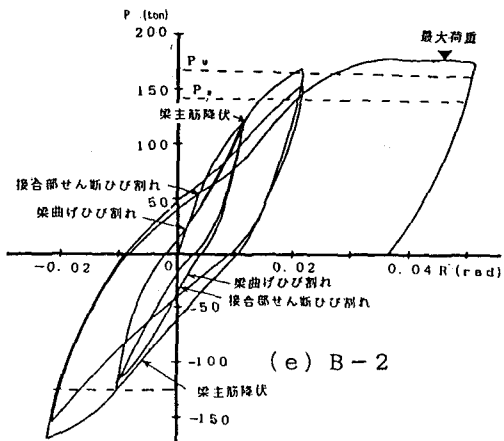
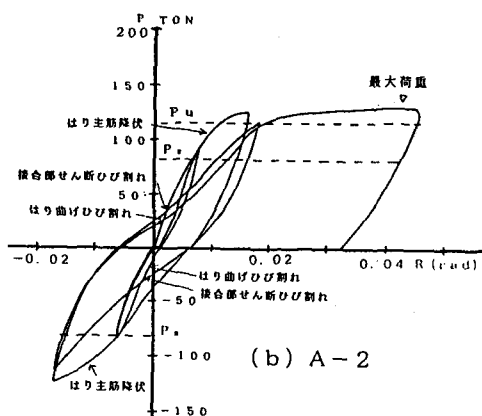
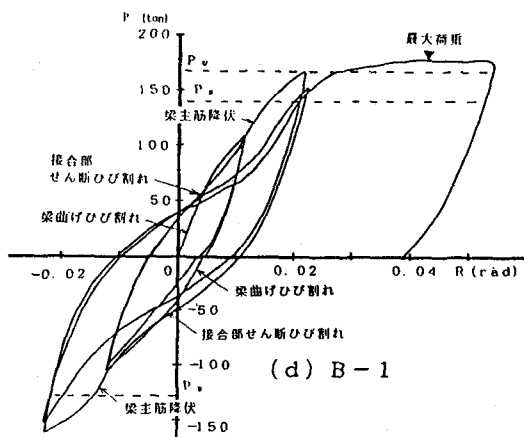
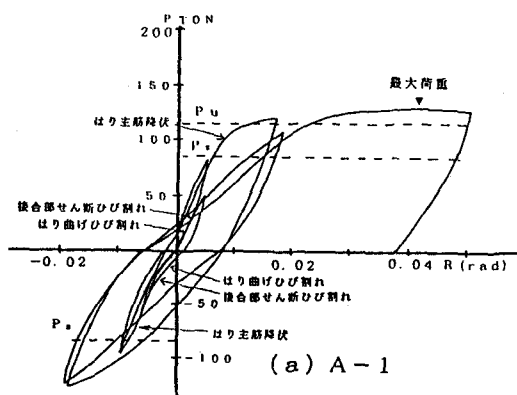


図-6 履歴曲線

表-3 諸荷重

試験体	荷重	はり曲げひび割れ荷重			接合部せん断ひび割れ荷重			曲げ降伏荷重			最大荷重		
		P_{bc} (t)		実/計	P_{sc} (t)		実/計	P_y (t)		実/計	P_u (t)		実/計
		実験値	計算値		実験値	計算値		実験値	計算値		実験値	計算値	
A-1	正	20.4	17.7	1.15	29.2	66.1	0.44	100.9	88.7	1.14	128.5	115.5	1.11
	負	8.5	16.7	0.51	42.7	66.1	0.65	80.5	87.3	0.92			
A-2	正	28.2	17.0	1.65	33.7	63.2	0.53	111.6	88.7	1.26	128.4	113.9	1.13
	負	16.2	15.8	1.03	24.1	63.2	0.38	114.3	87.3	1.31			
A-3	正	33.4	16.8	1.99	35.8	62.3	0.57	110.5	88.7	1.25	129.1	113.4	1.14
	負	17.8	15.5	1.15	27.0	62.3	0.43	101.3	87.3	1.16			
B-1	正	20.1	37.2	0.54	50.2	69.7	0.72	125.9	112.3	1.12	177.8	167.3	1.06
	負	17.5	23.7	0.74	54.6	69.7	0.78	123.4	83.2	1.48			
B-2	正	25.0	35.7	0.70	50.2	68.4	0.73	130.3	112.3	1.16	177.5	162.3	1.05
	負	19.8	23.2	0.85	31.7	68.4	0.46	100.3	83.2	1.21			
B-3	正	23.6	36.7	0.64	56.5	65.9	0.86	127.6	112.3	1.14	172.6	160.4	1.08
	負	25.0	22.0	1.14	25.0	65.9	0.38	109.5	83.2	1.32			

7. 耐力の検討

表-3に梁の曲げひび割れ荷重、接合部せん断ひび割れ荷重、梁の曲げ降伏荷重及び最大荷重を示す。各荷重は、骨組みの柱頭に作用する荷重で表している。以下それぞれについて検討する。

7-1 曲げひび割れ荷重

梁の曲げひび割れ荷重の計算値は、曲げひび割れモーメント M_{bc} を、

$$M_{bc} = 1.8 (F_c)^{1/2} \cdot Z_e$$

として求めた。ここで、 F_c はコンクリート圧縮強度、 Z_e は鉄骨、鉄筋を考慮した断面係数である。実験値の計算値に対する割合は、0.51~1.99 とかなりばらついている。

7-2 接合部せん断ひび割れ荷重

接合部せん断ひび割れ荷重の計算値は、建築学会 S R C 規準に準じて、

$$cV \cdot 3fs(1 + \beta) = h' / h ({}_bM_1 + {}_bM_2)$$

$$\beta = (15 \cdot tw \cdot scd) / (cb \cdot mcd)$$

として求めた。ここで、 cV は接合部コンクリート体積、 fs はコンクリートせん断強度、 tw は鉄骨ウェブ厚さ、 scd はフランジ重心間距離、 cb は柱幅、 mcd は柱の主筋間距離、 ${}_bM_1$ ${}_bM_2$ は接合部に取りつく左右の梁から加えられる曲げモーメントである。実験値は計算値に対して、0.38~0.86 とすべて小さい値であった。

7-3 曲げ降伏荷重

梁の曲げ降伏荷重の計算値は、梁の降伏曲げモーメント M_y を、

$$M_y = 0.9 \cdot \sum At \cdot r_{oy} \cdot d + sZ \cdot s_{oy}$$

として求めた。ここで、 At は引張鉄筋断面積、 r_{oy} は鉄筋降伏応力度、 sZ は鉄筋断面積、 s_{oy} は鉄骨降伏応力度である。降伏荷重の実験値は、引張鉄筋が降伏歪に達したときの荷重とした。実験値は計算値に対して、A-1 負載荷を除き、1.12~1.48 である。計算値は、おおむね安全側の値を与えている。

7-4 終局荷重

図-7に柱の終局耐力線及び比較のために梁の終局耐力線及び短期許容耐力線を示す。縦軸は軸力 N 、横軸は柱及び梁の曲げ耐力を骨組みの柱頭に作用する荷重 P で示したものである。終局耐力の計算値は、建築学会 S R C 規準に準じて、コンクリート強度 F'_c を圧縮側鉄骨比 sP_c により $F'_c = F_c (0.85 - 2.5 \times sP_c)$ とし、短期許容耐力の計算値は、同様に $F'_c = F_c (1 - 15 \times sP_c)$ として求めた。B-2、B-3 のスラブ下

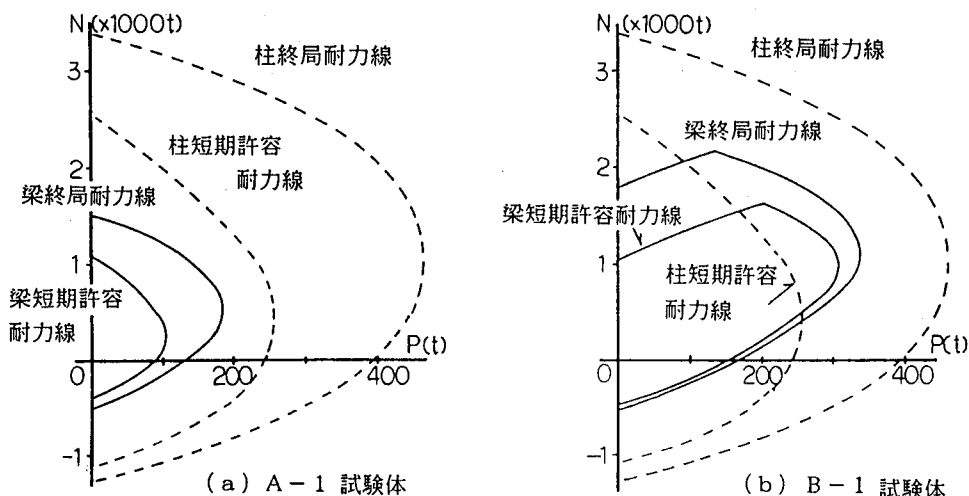


図-7 試験体の耐力線

筋は定着しておらず、また、スラブ下筋に貼付したワイヤーストレンゲージにおいても、下筋は降伏歪に達していないので、B-2、B-3のスラブ下筋は考慮していない。柱及び梁の耐力線は、各試験体によってF_cが若干異なるので同一線上に表せないが、その差はわずかであるのでAシリーズではA-1試験体、BシリーズではB-1試験体について示した。梁の終局耐力線及び短期許容耐力線上でN=0の時のPの値が図-6に示すP_u及びP_sである。実験値は、計算値に対して1.05~1.14となっており、計算値は安全側で精度よく実験値と一致した。

8. 結論

1) 梁及びスラブの下部にコンクリートの打ち継ぎを有する柱梁骨組は、一体打ちの柱梁骨組と比較して降伏耐力、最大耐力、履歴ループなどほとんど同様であり、PC化によるコンクリートの打ち継ぎの影響はないと言える。

2) 建築学会SRC規準によって求めた梁の終局耐力は、実大試験体の実験結果よりも、おおむね一割程安全側で設計式として妥当であった。

謝辞

本実験にあたり、明治大学狩野博士より御助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。また、実験に御協力いただいた大阪工業大学建築学科構造力学研究室の皆様にも深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 1987
- 2) 日本建築学会 地震荷重と建築構造の耐震性