

論文 壁式 PCa 構造における基礎ばりの PCa 化と鉛直接合部に 関する実験研究

筏井文隆*1・小林克巳*2・新井勇作*3・山下能弘*4

要旨：施工精度の向上のために基礎ばりの PCa 化が有効である。本論では鉛直接合部のせん断力伝達に関して、主にコッター形状と個数をパラメータとしたせん断実験を行い、剛性、耐力等に及ぼす影響を調べ、在来一体打ち工法と同等な性能を有する接合方法について検討した。その結果、せん断型に分類されるコッター形状とすれば、一体打ちと同等の性能を発揮することがわかった。しかし、既往の壁式 PCa 上部構造の設計式を適用し、せん断型コッターとして接合部の許容せん断力を算定すると、安全側の評価にはなるが、コッターの破壊モードが対応せず、不合理な評価となることがわかった。

キーワード：壁式 PCa 構造、基礎ばり、鉛直接合部、コッター、せん断耐力

1. はじめに

壁式 PCa 構造においても、基礎は一体打ちの鉄筋コンクリート造としなければならない^{1),2)}。しかし、基礎部分を PCa 化すれば施工精度の向上を図ることができ、高品質の建築生産が可能となる。過去にも同様の開発研究が行われており^{3),4)}、在来一体打ちとの比較が行われている。

図-1 に工法の概要を示す。基礎ばりのみを PCa 部材として製作し、基礎スラブは現場打ちの鉄筋コンクリート造とする。基礎ばりの鉛直接合部は、上部耐力壁パネル鉛直接合部の真下に設け、開口部下には設けない。すなわち、基礎ばり鉛直接合部上には耐力壁あるいは壁柱が存在することになる。したがって、基礎ばり鉛直接合部では曲げの影響は少なくなる。

基礎ばりと基礎スラブの水平接合部にはコッターが設けられるが、上部構造からの応力は基礎ばりのみで負担し、基礎スラブについては軸力を分散して地盤に伝え、分布接地圧を得られればよいと考えている。

本論では鉛直接合部のせん断力伝達に関して、主にコッター形状と個数をパラメータとし

たせん断実験を行い、剛性、耐力等に及ぼす影響を調べ、在来一体打ち工法と同等な性能を有する接合方法について検討した。

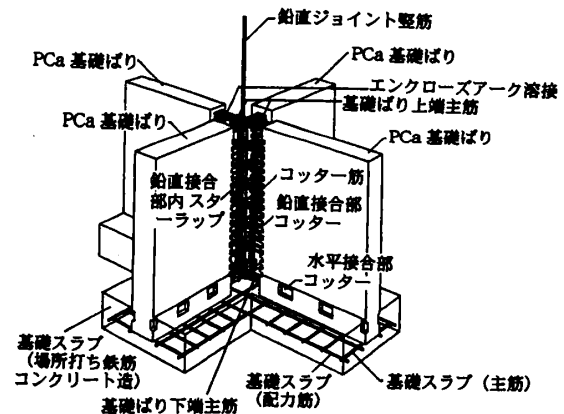


図-1 工法の概要図

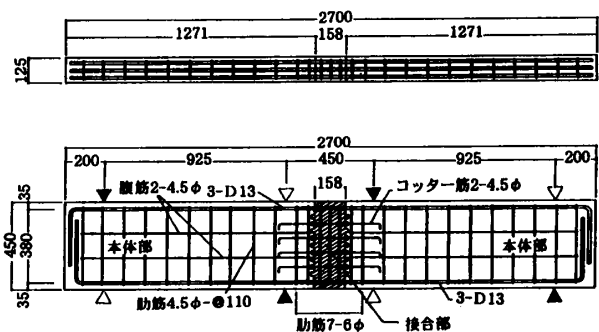


図-2 試験体形状

*1 福井大学大学院 工学研究科システム設計工学専攻 工修 (正会員)

*2 福井大学教授 工学部環境設計工学科 工博 (正会員)

*3 木内建設(株)開発部開発課課長 (正会員)

*4 木内建設(株)開発部開発課主任

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状を図-2に示す。試験体の断面はいは約1/4モデル450mmとし、幅は1/2モデル125mmとした。鉛直接合部は試験体中央158mmの区間に設けた。主筋、コッター筋は、本来は溶接継手を用いて接合するが、溶接継手が鉛直接合部の性状に与える影響は少ないと判断し、本実験では通し鉄筋とした。試験体

数は、表-1に示す10体(一体打ち2体を含む)とした。コンクリートの設計基準強度は $F_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ とし、主筋にはSD345、補強筋には溶接金網用鉄線(φSWM-P)を用いた。コンクリートおよび鉄筋の材料特性を表-2、表-3に示す。試験体のコンクリート打設は、実験時期に合わせて、(AS-0~5)と(AS-10~13)の2回に分けて行った。

表-1 試験体一覧

試験体名 No.	呼び名	主筋 (SD345)	主筋比 Pt(%)	補強筋 (SWM-P)	補強筋比 Pw(%)	コッター			
						形状	個数	深さ(mm)	コッター筋
AS-0	一体打					—	—	—	—
AS-1	波3					波形	3	—	6-4.5φ
AS-2	波4	3-D13	0.753	6-4.5φ	0.339	波形	4	—	8-4.5φ
AS-3	波3'					波形	3	—	6-6.0φ
AS-4	浅箱3					箱形	3	11.7	6-4.5φ
AS-5	浅箱4					箱形	4	11.7	8-4.5φ
AS-10	一体打					—	—	—	—
AS-11	深箱3					箱形	3	16.8	6-4.5φ
AS-12	深箱4	3-D13	0.734	7-6.0φ	0.703	箱形	4	16.8	8-4.5φ
AS-13	連箱					連続	15.0	8-4.5φ	

表-2 コンクリート材料特性

試験体名	打設箇所	圧縮強度 (kgf/cm^2)	圧縮強度 時差(μ)	ヤング係数 (kgf/cm^2)	割裂強度 (kgf/cm^2)
AS-0~5	接合部	291	2480	2.29×10^4	25.4
	本体部	206	2130	2.00×10^4	21.3
AS-10~13	接合部	229	1950	2.15×10^4	18.3
	本体部	178	1870	1.88×10^4	16.9

表-3 鉄筋材料特性

種別	降伏強度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 (kgf/cm^2)
D13	3990	6070	1.91×10^6
D13*	4020	5780	1.85×10^6
4.5φ	5020**	5820	2.10×10^6
6.0φ	6040**	6500	2.09×10^6

*AS-10~13に使用

**0.2%耐力

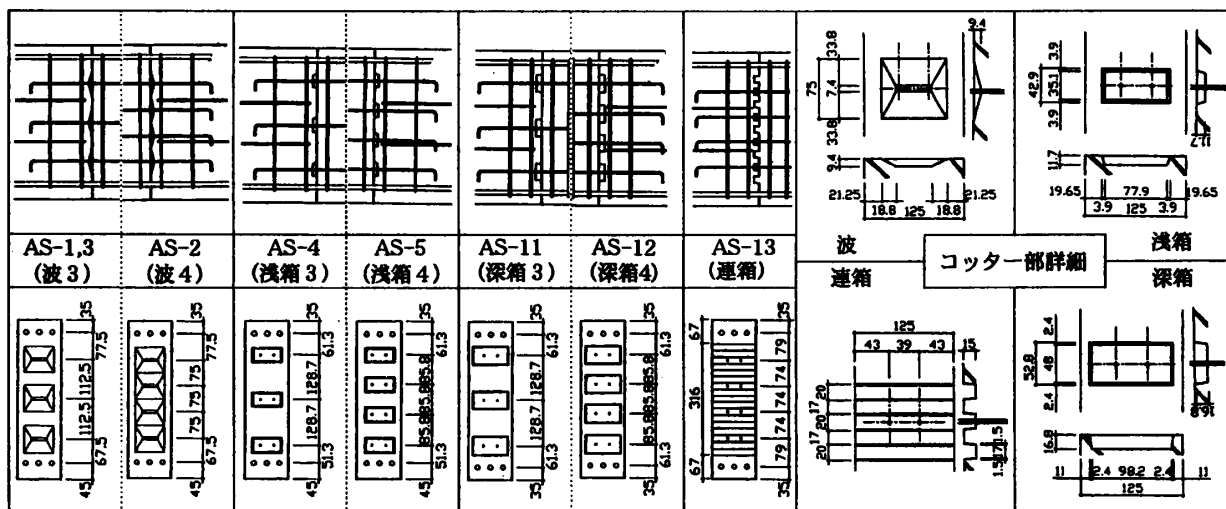


図-3 接合部詳細

2.2 実験パラメータ

実験パラメータは、主にコッター形状(箱形、波形、連続箱形)とその個数とした。箱形コッターに関しては、コッター深さ(11.7 mm, 16.8 mm)もパラメータに加えた。なお、図-3に示すように、箱形コッターとは上部耐力壁パネルの鉛直接合部に用いる支圧型コッターである。

波形は、製作の容易さを考えたもので、支圧面積が大きくなるが、接合面ですべりが生じると、剛性低下が大きくなることが心配される。箱形コッターの深さと数をさらに増やしていくと、連続箱形となり、プロポーショナルにはせん断型コッターとなるので、従来の規準類¹⁾を適用すると許容せん断力が低く算定される。

2.3 実験方法

連続ばり形式とし、接合部を含む区間が逆対称曲げモーメント状態になるようにして、載荷を行った。加力方法および加力装置を図-4、図-5に示す。せん断スパン比は、 $M/Qd = 0.56$ である。加力点位置に取り付けたゲージホルダー間の変位を、変位計を用いて測定し、これを相対変位とした。また、図-6のように接合部目地の開きとずれをπゲージを用いて測定した。加力制御は、以下の項目に示す設計における検討用せん断力時の荷重で、正負一回ずつの正負交番漸増繰返し載荷とした。

- ① ひび割れ以前
- ② ①と③の間
- ③ 接合部の短期検討用せん断力(RQ)
- ④ 接合部の終局検討用せん断力(Q_{vu})
- ⑤ はりとしての終局せん断耐力(Q_{su})

RQ (支圧型コッター)、 RQ (せん断型コッター)、 Q_{vu} (支圧型コッター)、 Q_{vu} (せん断型コッター)、 Q_{su} (荒川mean式)の算定式を式(1)～式(5)に示す。

$$RQ(\text{支圧型}) = A \cdot f_{cs} \cdot n \quad (1)$$

$$RQ(\text{せん断型}) = B \cdot f_{ss} \cdot n \quad (2)$$

$$Q_{vu}(\text{支圧型}) = 0.8F_c \cdot A \cdot n + \Sigma(av \cdot \sigma_y) \quad (3)$$

$$Q_{vu}(\text{せん断型}) = 0.1F_c \cdot B \cdot n + \Sigma(av \cdot \sigma_y) \quad (4)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 \cdot P_t^{0.23} (F_c + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad (5)$$

ここに、

A : コッターの支圧面積(cm^2)

B : コッターのせん断面積(cm^2)

n : コッターの個数

F_c : コンクリート設計基準強度(kgf/cm^2)

$f_{cs} : 0.8F_c$

$f_{ss} : 20 (\text{kgf/cm}^2)$

av : コッター筋の断面積(cm^2)

σ_y : コッター筋の強度(kgf/cm^2)

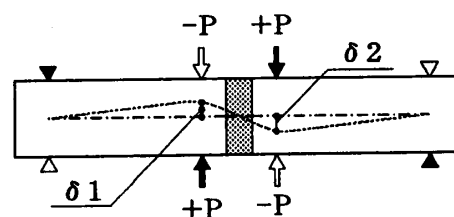
P_t : 引張鉄筋比(%)

P_w : 補強筋比

σ_{wy} : 補強筋強度(kgf/cm^2)

b : はり幅(cm)

j : 応力中心間距離(cm)



$$\delta = \delta 1 + \delta 2 \quad R = \delta / 450$$

$$Q = 0.804 \cdot P \quad \tau = Q / (b \cdot j)$$

図-4 加力方法

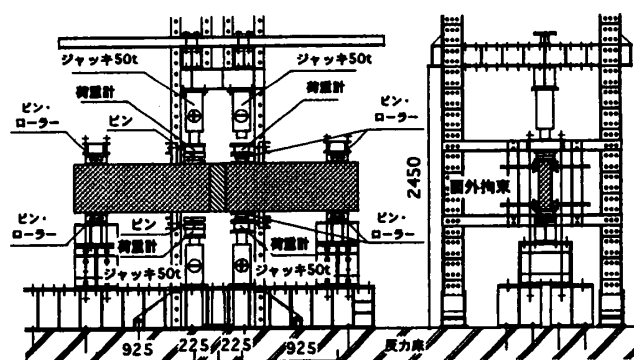


図-5 加力装置

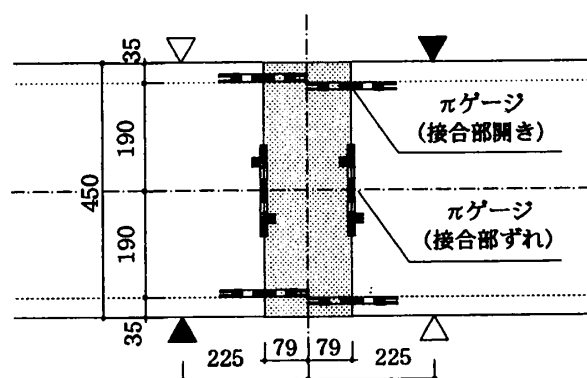


図-6 目地の開きとずれの測定方法

3. 実験結果

各試験体のせん断力(Q)・相対変位(δ)関係の包絡線を図-7～図-9に示す。図-7は、箱形と波形のコッター形状の違いについて検討したもので、コッター数が3の試験体を示した。図-8は、コッターの個数について検討したものである。図-9は、コッター深さの効果について検討したものである。

3.1 剛性低下

一体打ちの試験体では、曲げ初亀裂と、加力点を結ぶ線上に発生するせん断ひび割れによって、剛性が大きく変化する。接合部を有する試

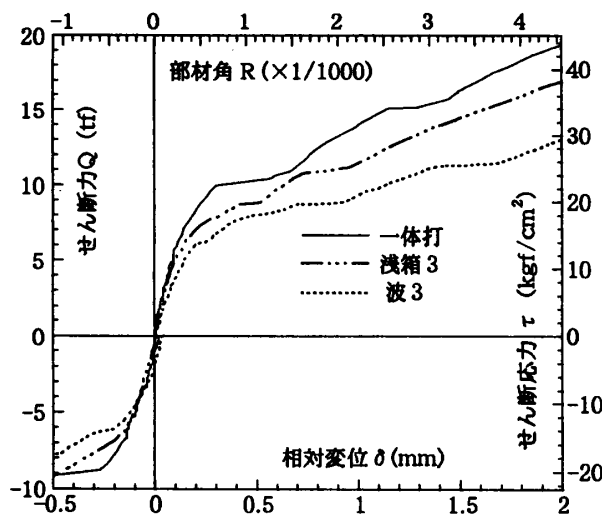


図-7 Q-δ関係(コッター形状)

験体でも、一体打ちの曲げ初亀裂や、せん断ひび割れの発生に相当する剛性の変化がみられる。これらを O_1 、 O_2 とし、 O_1 と原点を結んだ直線の傾きを初期剛性(K_1)とし、 O_1 と O_2 を結んだ直線の傾きを第二剛性(K_2)とした。各試験体の O_1 、 O_2 に対応するせん断力(Q)、相対変位(δ)と、 K_1 、 K_2 の一覧を表-4 に示す。なお、 K_1 、 K_2 については、一体打ちを 100 とした場合の指標値も示した。

図-7 にみられるように、波形は箱形よりも早い段階で剛性が低下している。浅箱 3、4 の O_2 点のせん断力が約 10tf であるのに対し、波 3、4、3' の O_2 点のせん断力は約 6tf である。したがって、波形は箱形に比べ早期に剛性が低下しており、一体打ちのものと同等な性能を得ることはむずかしいと考え、コッター形状としては箱形のものがよいと判断した。以後の検討は波形を除いて行う。

図-8 をみるとコッター数の増加によって、剛性が一体打ちのものに近づいていくことがわかる。コッター数が 3 から 4 になると、コッター深さによらず、 K_2 の指標値は約 1.5 倍になっている。さらにコッター数が多くなる連続箱形試験体の K_2 は一体打ちと同等の値を示した。

コッター深さが深くなることでも剛性は一体打ちに近づいていくことが図-9 よりわかる。

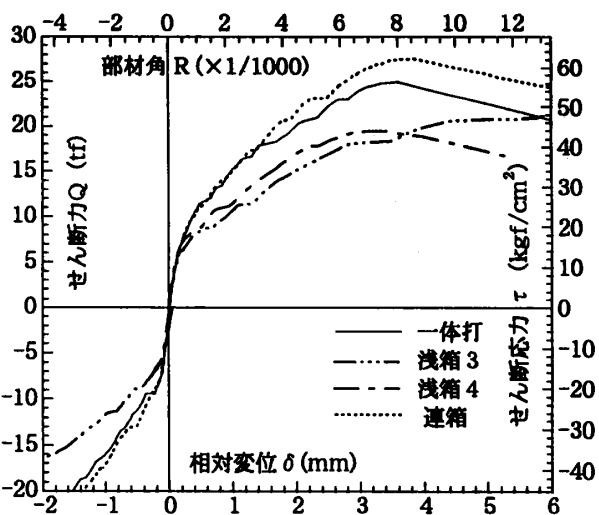


図-8 Q-δ関係(コッター数)

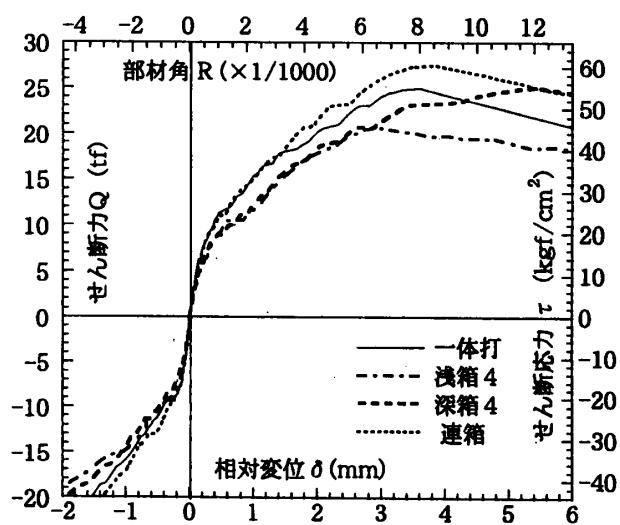


図-9 Q-δ関係(コッター深さ)

表-4 各試験体の剛性一覧

試験体名		O_1		O_2		初期剛性(K_1)		第二剛性(K_2)	
No.	呼び名	Q (tf)	δ (mm)	Q (tf)	δ (mm)	(tf/mm)		(tf/mm)	
AS-0	一体打	5.89	0.09	9.97	0.30	65.4	100	19.5	100
AS-1	波 3	3.31	0.08	6.03	0.20	40.1	61	23.2	119
AS-2	波 4	3.04	0.08	5.79	0.23	39.1	60	18.7	96
AS-3	波 3'	3.77	0.08	5.97	0.17	47.2	72	25.6	131
AS-4	浅箱 3	5.27	0.11	10.8	0.73	47.9	73	8.9	46
AS-5	浅箱 4	3.68	0.10	10.5	0.60	36.8	56	13.5	70
AS-10	一体打	5.02	0.11	7.60	0.20	45.6	100	28.7	100
AS-11	深箱 3	3.53	0.09	7.25	0.35	39.2	86	14.3	50
AS-12	深箱 4	4.39	0.13	6.74	0.24	33.8	74	21.4	74
AS-13	連箱	4.19	0.09	6.49	0.16	46.6	102	32.9	115

コッターが深くなると、浅いものに比べ K_1 の指標値は約 2～3 割大きくなり、コッター深さが深く、数の多くなる連続箱形のものは、 K_1 、 K_2 とも一体打ちと同等の値を示した。

以上のことから、コッターの個数が多くなるほど、また、コッター深さが深いほど剛性が一体打ちに近づくことになる。

3.2 設計における検討用せん断力

せん断耐力実験値および計算値 Q_{su} (式(5))と、接合部の短期検討用せん断力 RQ (式(1),式(2))および接合部の終局検討用せん断力 Q_{vu} (式(3),式(4))を 表-5 に示す。 Q_{vu} および RQ は、コッター数に比例した値となる。コッター数が3と4のものについて、せん断耐力を比較すると、コッター数に比例した値を示していない。しかし、コッター深さが深いものは、比較的コッター数の比例に近い値を示した。連続箱形コッターの場合、実験値は一体打ちと同等のせん断耐力を示しており、せん断型コッターとして RQ (式(2))や Q_{vu} (式(4))を適用するとかなり安全側の評価となる。

3.3 破壊性状

加力スパン内での最終ひび割れ状況を 図-10 に示す。破壊状況は、コッターの個数によって 図-11 に示す3種類のパターンに分類できる。パターンⅠは、コッター数3の試験体に多くみられたもので、せん断ひび割れは接合部の目地に沿って長く伸び、破壊には接合部のずれが大きくともなった。コッター数が4になると、パターンⅡのように、接合部に沿うせん断ひび割れは短くなり、最終破壊時における接合部のずれは、パターンⅠのものよりも少なくなった。連続箱形までコッター数が増加し、コッターが深くなると、せん断ひび割れは一体打ちにみられるように、パターンⅢの加力点間を結ぶ斜めひび割れとなった。

3.4 目地の開きとずれ

短期検討用せん断力 RQ (式(1),式(2))時における接合部の開きおよびずれの最大値を 表-6 に示す。連続箱形試験体の場合、 RQ (式(2))の値が低くなるため、はりとしての短期許容せん断力 Q_A 時の値も示し、比較した。連続箱形試験体は RQ 時で、開き0.02mm、ずれ0.006mmであり、 Q_A のときでも開き0.16mm、ずれ0.27mm

表-5 せん断耐力実験値と設計における検討用せん断力計算値

試験体名	呼び名	せん断耐力(tf)		検討用せん断力(tf)			
		Q_{max}	Q_{su}	Q_{max}/Q_{su}	RQ	Q_{vu}	Q_{max}/Q_{vu}
AS-0	一体打	25.3		1.20	—	—	—
AS-4	浅箱3	19.5	21.1	0.92	4.82	9.64	4.05
AS-5	浅箱4	20.6		0.98	6.43	12.9	1.60
AS-10	一体打	24.9		1.05	—	—	—
AS-11	深箱3	22.2	23.8	0.93	8.52	13.3	2.61
AS-12	深箱4	25.0		1.05	11.4	17.8	1.40
AS-13	連箱	27.6		1.16	4.00	10.6	2.60

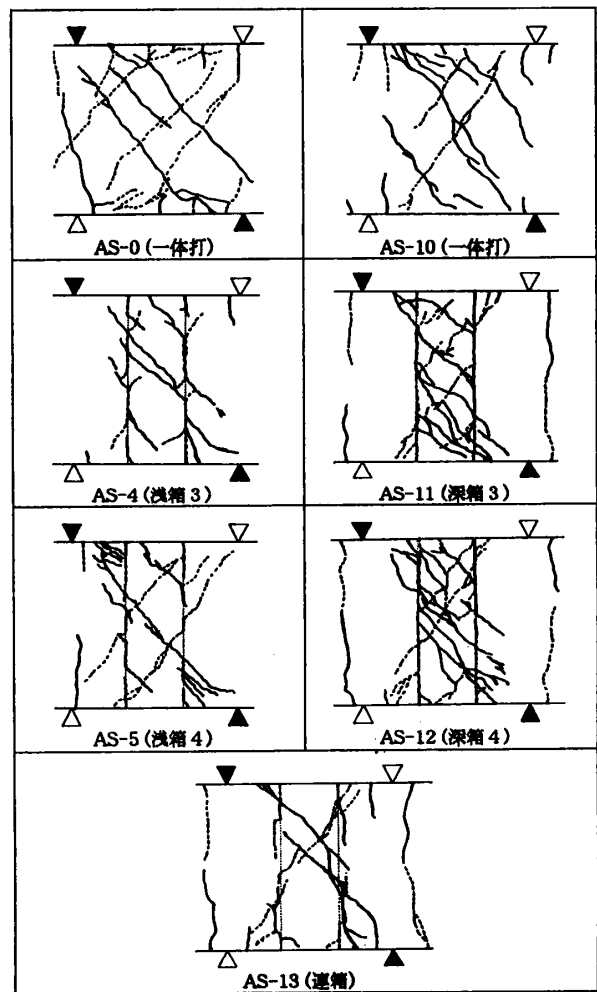


図-10 最終ひび割れ状況

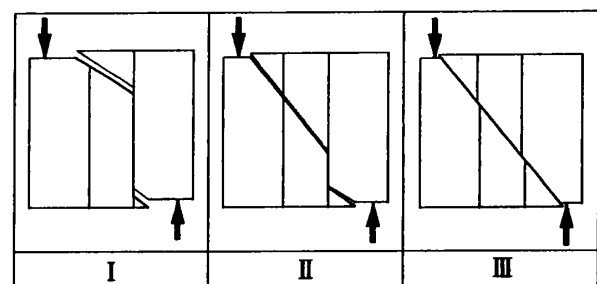


図-11 接合部破壊パターン

程度であった。他の試験体では、開き 0.04～0.23mm，ずれ 0.04～0.41mm であった。連続箱形のQAは，他の試験体のRQよりもせん断力レベルが大きくなるが，目地の開きとずれは他の試験体とくらべ，特に大きな値ではなかった。

3.5 連続箱形コッターを有する接合部の

許容せん断力

一体打ちのせん断耐力を基準としたときの各試験体のせん断耐力実験値 Q_{max} ，接合部の終局検討用せん断力 Q_{vu} (式(3),式(4))，短期検討用せん断力 RQ (式(1),式(2))との関係を 図-12 に示す。連続箱形のものについては，はりとしての短期許容せん断力 Q_A^0 との関係も示した。

上部壁式 PCa 構造の設計式を適用すると，連続箱形のはりせん断型で RQ (式(2))が計算されるため，実際のせん断耐力とくらべ，短期許容せん断力は極めて小さく算定される。連続箱形試験体では，接合部の目地に大きな開きとずれが生じていないことから，コッター部では支圧およびせん断の両方で応力伝達が行われており，大きなコッター耐力を有しているため，はりとしてのせん断破壊に至ったと考えられる。したがって，式(2)による短期許容せん断力は，安全側の値を与えるが，コッターの破壊モードと対応せず，せん断耐力が小さくなる他の箱形コッターよりも低く算定されてしまい，合理性に欠けると思われる。

4. まとめ

連続箱形コッターを有する試験体が，剛性，耐力，破壊形式とも最も一体打ちに近い性能を示した。ただし，上部壁式 PCa 構造の設計式を適用して，連続箱形コッターを有する PCa 基礎ばり鉛直接合部の短期許容せん断力を求めると，安全側の評価にはなるが，コッターの破壊モードが対応せず，不合理な評価となることがわかった。

今後，連続箱形コッターのせん断力伝達に関して，解析的手法も用いながら合理的な評価をしていく必要があろう。

表-6 目地の開きとずれ

試験体名		開き	ずれ
No.	呼び名	(mm)	(mm)
AS-4	浅箱 3	0.042	0.072
AS-5	浅箱 4	0.055	0.043
AS-11	深箱 3	0.111	0.283
AS-12	深箱 4	0.232	0.405
AS-13	連箱	0.019	0.006
		0.163*	0.267*

* Q_A 時の値

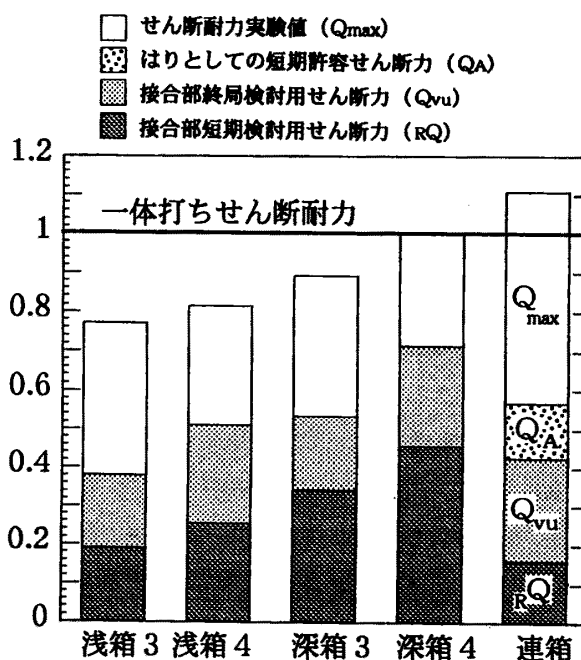


図-12 式(1),式(2)による許容せん断力とせん断耐力実験値の比較

参考文献

- 1) 日本建築学会：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説，1982
- 2) 建設省告示第1319号：壁式鉄筋コンクリート造（壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造を含む。）の技術的基準第4，1983. 7
- 3) 末永保美・石丸麟太郎・斉藤義雄：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造構面の力学的挙動に関する基礎的研究，（その14）壁式プレキャスト鉄筋コンクリート地中ばりのプレハブ化に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1475-1476，1973. 10
- 4) 三上勇夫・土居健二・池谷建男・横田克己・末永保美：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造基礎梁のプレハブ化に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1505-1506，1974. 10
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，16条，式(22)，1991