

論文 鋼板で補強されたコンクリート構造部材の力学的挙動

佐藤正浩*1・秋山達哉*2・古田智基*3・上村智彦*4

要旨：部材断面が、プレート、コンクリート、スパイラル筋で構成された梁と柱部材の曲げ挙動について、測定したプレートとコンクリートのひずみを用いて、詳細に検討を加えた。梁危険断面では、曲げ理論解析と異なった挙動を示すが、終局曲げ耐力時には、応力ブロック法と同じ応力分布となる。又、柱危険断面の挙動は、各プレート断面中央位置の応力度で評価すれば、断面分割法の曲げ解析が適用できる。

キーワード：プレート、応力分布、曲げ耐力、ひずみ、コンクリート

1. はじめに

従来の鉄筋コンクリート構造部材における主筋及び補強筋にかえて鋼板プレートをを用いた新しい構法として、プレートコンクリート（以下 PLRC）構法が提案されている¹⁾。既往文献²⁾で、若干の曲げ耐力評価について報告されているが、詳細な実験データの分析からの検討が行われたものでない。そこで、本研究では、PLRC構法の梁・柱部材について行われた実験結果から曲げ挙動について詳細な考察を行い、曲げ耐力評価の検証を行なう。図-1に、本構法の梁・柱部材断面及び柱梁接合部形状を示す。部材断面は、プレート、コンクリート、スパイラル筋で構成される。

2. 梁部材の曲げ挙動

2.1 実験概要

(1) 試験体

図-2に梁試験体を示す。試験体中央部には、加力スタブを設け、その位置で、プレートを突合わせ溶接している。プレートは両梁端部のエンドプレートに溶接し、定着している。材料特性については表-1に示す。

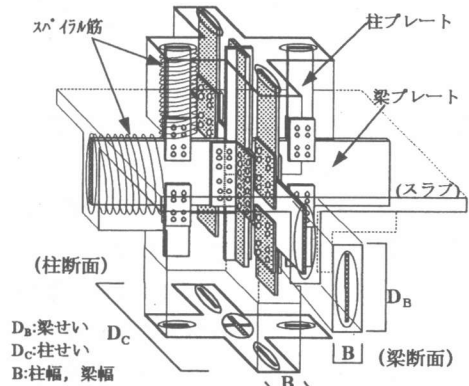


図-1 梁・柱部材断面及び柱梁接合部形状図

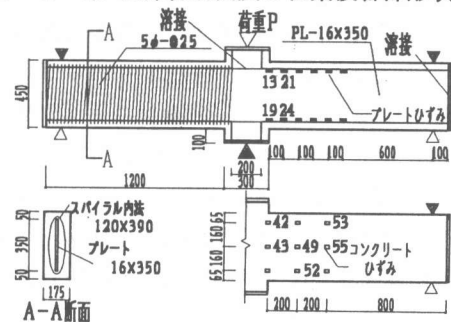


図-2 試験体形状寸法とひずみ測定位置

表-1 使用材料力学的特性

プレート、鉄筋	降伏応力度(MPa)	ヤング率(MPa)
PL15.5×40	331.4	2.50×10 ⁵
5φ	175.5	2.14×10 ⁵
コンクリート	圧縮強度(MPa)	ヤング率(MPa)
	39.3	2.45×10 ⁴

*1 ㈱東京建築研究所

工修 (正会員)

*2 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*3 山田建物㈱

工修 (正会員)

*4 芝浦工業大学助教授 工学部建築学科

工博 (正会員)

(2) 測定及び加力方法

試験体は両端で支持され、荷重は中央部で上下方向に加えた。変形は、中央部と両支点間の相対の変位を測定した。ひずみ測定は図-2の位置でプレートとコンクリートについて行った。

(3) 実験結果

加力点の曲げモーメントと変形関係である図-3の履歴ループは、紡錘形に近いループを示す。スタブ付根のプレート縁部降伏後も耐力は上昇するが、コンクリートの圧壊発生後、荷重は上昇せず変形だけ進行する。図-4に最終破壊状況を示す。曲げひび割れはスタブ近傍で大きく進展し、斜めひび割れは顕著には発生しなかった。

2.2 考察

2.2.1 プレートひずみ及びコンクリートひずみ

(1) プレートひずみ

図-5にプレートの曲げモーメント-ひずみ曲線を示す。図中の細線は実験値を示す。

ゲージ 13, 19 において、曲げ理論値と実験値の最大耐力は一致するが、最大耐力に近づくにつれて、実験値と理論値の大きさは、引張側、圧縮側ともに実験値の方が理論値より大きくなる。その傾向は、引張側において顕著である。ゲージ 13 は圧縮降伏、ゲージ 19 は引張ひずみ硬化現象を表している。尚、理論値は断面分割法で求め、梁せい方向のコンクリート断面を 90、プレート断面を 70 の要素に分割した。平面保持、コンクリートの応力ひずみ関係を ϵ 関数法、プレートの同関係を完全弾塑性とした。スパイラル筋の影響は考慮していない。

(2) コンクリートひずみ

図-6にコンクリートの曲げモーメント-ひずみ曲線を示す。図中、細線は実験値を、太線は曲げ理論値をそれぞれ表す。

スタブ近傍のゲージ 42 で圧縮ひずみは、実験値と理論値が最大荷重近傍までほぼ一致していることがわかる。梁せい中央部ゲージ 49 のひずみは、完全付着を仮定した理論値では引張側にあるのに対し、実験値は、圧縮に偏っている。

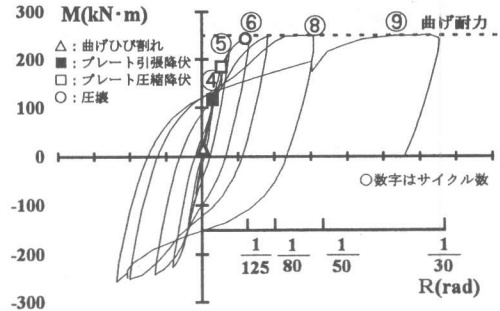


図-3 梁変形曲線



図-4 梁部材破壊状況

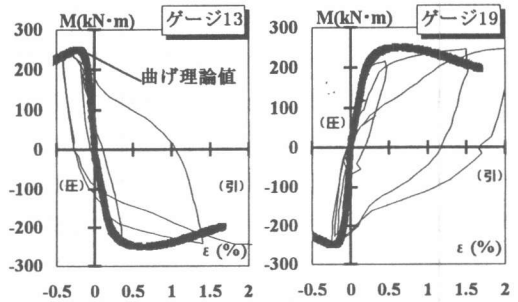


図-5 プレートひずみ曲線

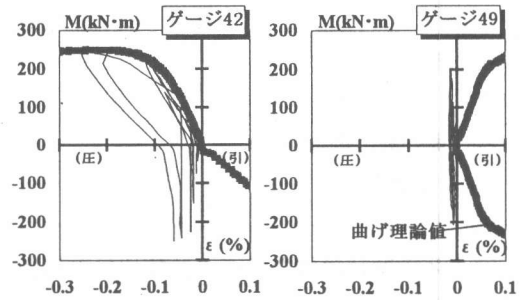


図-6 コンクリートひずみ曲線

このことは、実験時のコンクリート圧縮域が理論値よりも広がっていることを示している。

2.2.2 プレート断面の応力分布と合力

(1) プレート断面の応力分布

プレート断面のひずみ分布は、各断面の上端、下端で測定したひずみから中間部のひずみを直

線補間して求めた。ひずみからの応力変換は、完全弾塑性の応力-ひずみ関係として求めた。

図-7 にスタブ危険断面位置のゲージ 13, 19 のプレート断面における各サイクルの最大荷重時の応力分布を示した。曲げ理論値から得たプレート断面応力分布も合わせて示す。荷重サイクルが進むにつれて、理論値と実験値ともに、プレート断面における引張降伏域と圧縮降伏域は拡大していくが、理論値と実験値との降伏域の領域に差が生じている。6 サイクル時のプレート断面引張降伏域の割合を見てみると、実験値の 71% に対し、理論値では 50% となり、プレートの引張降伏域が曲げ理論値と比べ実験値の方が大きくなっている。

以上のことは、プレートの曲げ挙動が曲げ理論とは異なることを示している。

(2) プレート応力より求めた合力と合力位置

表-2 に、スタブ危険断面ゲージ 13, 19 の位置についてプレート応力より求めたプレート引張合力 T_s 、プレート圧縮合力 C_s 、軸方向力の釣り合いより求めたコンクリート圧縮合力 C_c 及び、それらの合力位置について、曲げ理論値と実験値の比較を示す。合力の大きさを理論値と比較すると、 T_s , C_s , C_c は実験値のほうが大きい。合力位置は、 T_s が理論値、実験値ともに徐々に断面中心に進行するのに対し、 C_s , C_c は変化が小さい。また、 C_c の合力位置と合力は理論値と異なり、実験値で梁断面中心に近く、大きい値となる。

2.2.3 曲げ耐力

プレート、コンクリートのひずみ、応力度を検討した結果から、曲げ耐力時には、プレート断面の応力分布は圧縮または、引張降伏の矩形応力状態となり、プレート断面の約 73% が引張領域となることが確認できた。従って、曲げ耐力時の断面のプレート及び、コンクリートの応力状態を図-8 のように仮定した。

1) 軸方向力の釣り合い式よりプレート引張域 K_1 とコンクリート圧縮域 K_2 の関係を求める。:

$$T_s - C_s - C_c = 0 \text{ より,}$$

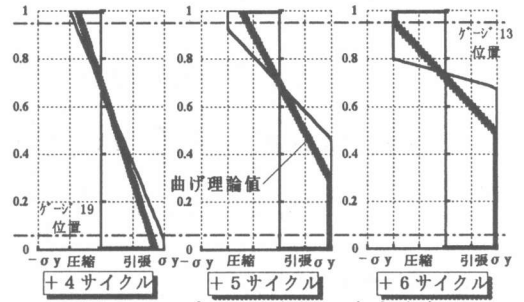
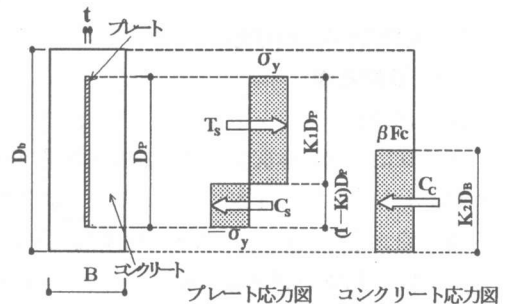


図-7 プレート断面の応力分布

表-2 合力の大きさと合力位置

梁断面	4 サイクル	5 サイクル	6 サイクル
C_c (kN)	-456.8	-709.2	-820.0
C_s (kN)	-102.4	-203.3	-299.4
T_s (kN)	559.2	912.6	1119.4
理論値	4 サイクル	5 サイクル	6 サイクル
C_c (kN)	-530.1	-726.3	-884.8
C_s (kN)	-143.8	-346.1	-430.1
T_s (kN)	673.9	1075.3	13149.2
実験値	4 サイクル	5 サイクル	6 サイクル



$$K_2 = \frac{F_w}{C_w} (2 K_1 - 1)$$

$F_w = D_p \cdot t \cdot \sigma_y$ (D_p , t : プレートせい, 厚さ σ_y : プレートの引張降伏応力度), $C_w = D_b \cdot B \cdot (\beta F_c)$ (D_b , B : 梁のせいと幅, βF_c : コンクリート有効圧縮強度 ($\beta = 0.85$)), 但し, プレートによるコンクリートの断面欠損は無視し, プレートとコンクリート間の付着はないとした。

2) 曲げモーメント式の表現：

$$M_U = \frac{1}{2} \left[F_W(1-K_1)(D_B + K_1 D_P) + F_W(2K_1-1) \left\{ 2 - \frac{F_W}{C_W} (2K_1-1) \right\} D_B - K_1 F_W(D_B - D_P + K_1 D_P) \right] \quad (1)$$

3) 曲げ終局耐力式

プレート引張域 K_1 又はコンクリート圧縮域 K_2 は、曲げ終局耐力 M_u を断面の力の釣合条件下で、最大とするものとする。

$$\frac{dM_U}{dK_1} = 0 \text{ より,} \\ K_1 = \frac{2 F_W D_B + C_W (D_B + D_P)}{4 F_W D_B + 2 C_W D_P} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{F_W D_B}{2 F_W D_B + C_W D_P} \quad (3)$$

$$M_U = \frac{1}{4} \left(F_W D_P + \frac{C_W F_W D_B^2}{C_W D_P + 2 F_W D_B} \right) \quad (4)$$

式(2)～(4)に、材料特性等の諸係数を代入して曲げ終局耐力を求めると、 $M_u=251(\text{kN}\cdot\text{m})$ 、 $K_1=0.71$ となり、実験値から得られた $M_u=267(\text{kN}\cdot\text{m})$ 、 $K_1=0.73$ の値に対応する。

3. 柱部材の曲げ挙動

3.1 実験概要

(1) 試験体

図-9に柱試験体図を示す。脚部の固定用スタブ部分で、柱プレートが、スタブプレートに隅肉溶接で固定されている。また、柱頭加力スタブ部分では、拘束を極力減らすためにスタブ内の柱プレートは、コンクリートの中に埋め込んである。材料特性を表-3に示す。

(2) 測定及び加力方法

加力の変形制御とし、一定軸力を加えながら、柱頭部加力スタブの左右2台のオイルジャッキを同時に使用し、1/2押し引き均等水平の繰返し載荷を行なった。軸力載荷は、平均圧縮応力 $4.9\text{MPa}(0.2F_c)$ となるように試験体上部に加力した。³⁾ ひずみ測定は、図-9の位置でプレート両面について行なった。

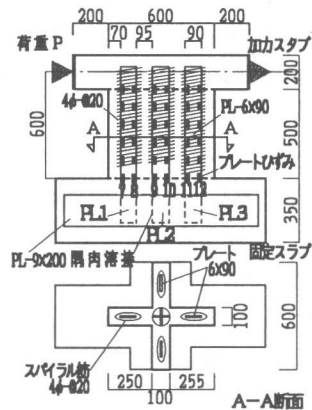


図-9 試験体形状・寸法及びひずみ測定位置

表-3 材料力学的特性

プレート・鉄筋	降伏応力(MPa)	ヤング率(MPa)
PL90×06	360.9	2.01×10^5
4φ	205.9	2.06×10^5
コンクリート	圧縮強度(MPa)	ヤング率(MPa)
	22.7	1.52×10^4

(3) 実験結果

図-10に危険断面位置曲げモーメント-部材角を示す。又、図-13に各荷重段階の加力構面の破壊状況を示す。危険断面位置における曲げモーメント算定には $P-\delta$ 効果を含めている。ひび割れは、柱脚部に曲げひび割れ、高さ中央部十字型柱断面入り隅部にせん断ひび割れが発生した。袖壁部圧縮側と引張側のプレート縁で圧縮降伏、引張降伏が見られ、その後も耐力は上昇し、最大耐力時には、柱脚部コンクリート圧壊発生に伴い耐力上昇せず変形が大きくなる。耐力低下時には、コンクリート圧壊域は袖壁プレート位置まで及ぶ。

3.2 考察

3.2.1 プレートひずみ

図-11に危険断面位置プレートの曲げモーメントとひずみ関係図を示す。正荷重時に引張側となる PL1 ゲージ位置7(図-9参照)のプレートひずみは、初期サイクルでは、理論値とほぼ同じ値を示すが、その後、圧縮ひずみ、引張ひずみ共に実験値が理論値より大きくなり、その傾向はサイクルが進むにつれて大きくなる。最大

耐力以前のサイクル時に引張降伏、圧縮降伏に達した。同じ PL1 ゲージ位置 8 プレートひずみは、初期サイクルにおいては理論値と一致するが、その後、サイクルが進むにつれて、正負荷重時において理論値のひずみ正負方向と実験値のひずみ正負方向とは異なりその傾向は強くなる。PL3 ゲージ位置 11 も、その特徴は同じである。このひずみ性状は、部材角の増加に伴う拘束モーメントが各プレートの柱頭、柱脚部に生じるためと考えられる。柱断面中央の PL2 ゲージ位置 9, 10 は、初期サイクルでは、理論値とほぼ一致しているが、その後、圧縮ひずみ、引張ひずみ共に実験値が理論値より大きくなり、その傾向はサイクルが進むにつれて大きくなり、最大荷重時に圧縮域、引張域ともに降伏ひずみに達している。

3.2.2 危険断面プレートの応力分布

図-12 に危険断面位置におけるサイクル毎のプレート応力分布を示し、曲げ理論値と比較している。○印はプレート断面中央位置における応力度を示している。応力度算定手法は、「2.2.2」のプレート断面の応力算定と同様に行なっている。プレート断面縁での実験値は理論値と異なる。サイクルが進むにつれこの傾向はより大きくなる。最大荷重の 72% に相当する 4 サイクル最大荷重時と、同じく 97% に相当する 6 サイクル最大荷重時のプレート応力分布は、各プレート断面中央位置において曲げ理論値と一致している。最大荷重時 8 サイクルにおいては、若干差異を生じる。

図-13 (a)(b) に各サイクルの部材方向のプレート応力分布とひび割れ状況を示す。点線は曲げ理論値を示している。応力分布は、部材方向の各位置のひずみゲージからプレート中央部の応力を算定している。プレートが引張応力を受ける PL1 は実験値と理論値が、初期の段階で一致しない位置が現れ、その位置関係は、ひび割れ位置と対応している。即ち、柱脚部と柱中央部のプレート上を横切るコンクリートの曲げひび割れにより、この区間のプレート応力

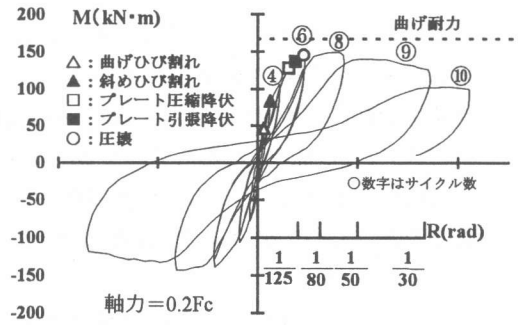


図-10 柱変形曲線

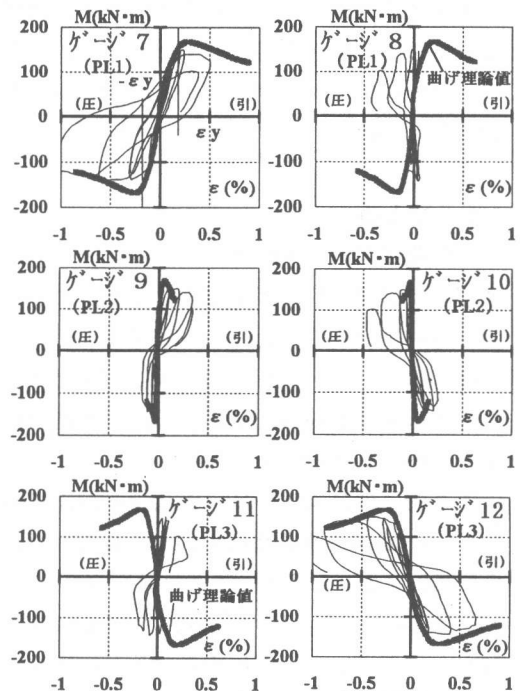


図-11 プレートひずみ曲線

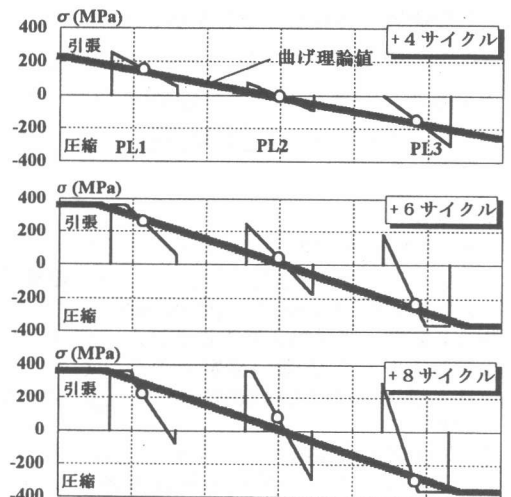


図-12 危険断面位置のプレート応力分布

が一定となる様相を呈する。また、荷重が上昇するに連れて引張応力を受けるプレートの部材方向応力分布には勾配がなくなり柱頭から柱脚にかけて、一定応力となる。プレートが圧縮を受ける時の実験値と理論値は、最大耐力まで危険断面位置において実験値は理論値と一致する。

3.2.3 曲げ耐力

表-4に既往の PLRC 構法柱実験の形状と寸法を示し、図-14に既往実験結果と曲げ解析結果との比較を示す。図に示す様に、実験値と解析値とは、(解/実=0.84~1.15)の範囲内で一致した。

4. まとめ

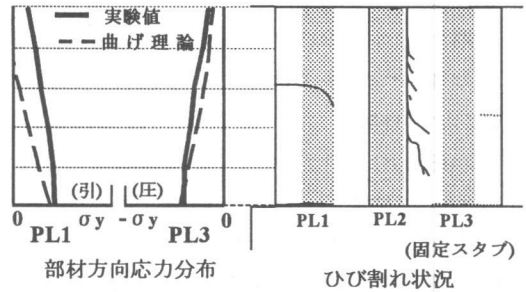
梁の曲げ挙動の検討では、①断面分割法の曲げ解析結果とは、断面応力は異なること、②終局曲げ耐力時に断面応力分布は応力ブロック法の値となることを示し、終局曲げ耐力式を求めた。尚、実験資料不足の為、適用範囲決定等、検討の余地がある。

柱の曲げ挙動検討では、①危険断面位置の各プレート断面中央位置において、最大耐力時まで理論値と一致する。②部材軸方向のプレート応力度分布から、最大耐力時に引張側では柱頭から柱脚にかけ一定応力になる。③危険断面位置における曲げ耐力は断面分割法から算定が可能性であることを各々示した。

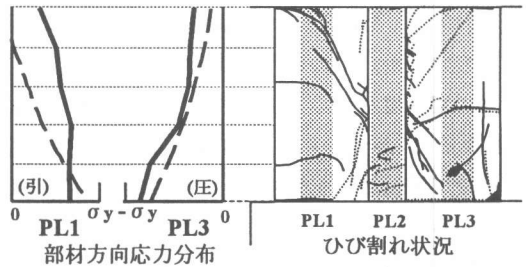
以上、梁及び柱曲げ耐力が曲げ理論値と一致するのは、梁端及び、柱脚部でプレートが十分定着されていたことに起因する。

参考文献

- 鈴木悦郎・梅村魁・清田清司ほか：プレートコンクリート構造の提案その1，日本建築学会学術講演構概集，C，pp.843-844，1989
- 山本泰稔・梅村魁・鈴木悦郎ほか：プレートコンクリート構造の提案その3，その4，日本建築学会学術講演構概集，C，pp.267-270，1990
- 大矢俊樹・清田清司・山本泰稔ほか：プレートコンクリート構法の開発研究その2，日本建築学会学術講演構概集，C，pp.945-946，1991



(a) 4サイクル



(b) 8サイクル

図-13 各サイクル部材方向のプレート応力度分布とひび割れ状況

表-4 既往の PLRC 構法柱実験の形状と寸法

試験体名	A	B	C,D,E	F,G
D	600	600	600	450
B	100	100	10	100
Dp	90	90	90	75
t	6	6	6	6
加力形式	①	①	①	②
シラスポン比	0.50	0.75	1.00	1.75

加力形式：①片持ち梁形式，②逆対称加力形式

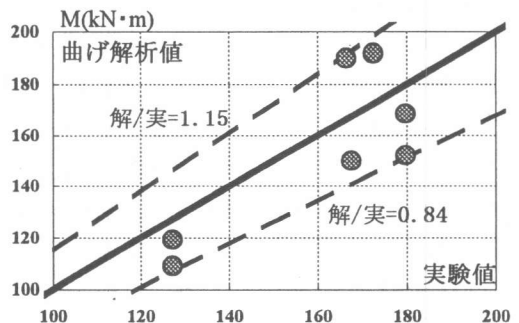


図-14 実験値と曲げ解析結果の比較