

## 論文 フラットプレート構造の高層建物への適用に関する研究

高田香織\*1・津田和明\*2・江戸宏彰\*3

**要旨：**一般矩形梁に比べ、せいが小さく、幅の大きいフラットプレート構造の、柱との接合部周りの主筋量を増大させて、critical section(曲げ降伏位置)を柱フェースからスパン中央寄りに移行させた改良型フラットプレート構造を考案した。また、その基本的性状を把握するために構造性能確認実験を行った結果、改良型の復元力特性が在来型のものよりも優れていることを確認した。さらに実験結果に基づき、フラットプレートの復元力特性の評価手法を考案した。

**キーワード：**フラットプレート、高層建物、曲げ降伏位置、線材モデル、復元力特性

## 1. はじめに

一般のラーメン構造の建物に比較して、フラットプレート構造を用いた建物は梁型が偏平なため、より良い室内空間の確保が可能である。しかし、フラットプレートは一般の梁に比べて剛性、耐力および変形能が小さく、高層建物への適用は困難であると考えられてきた。そこで、フラットプレート構造の高層化を目的として、フラットプレートのひび割れ後の剛性、曲げ強度の増大および靱性の向上を意図し、フラットプレートのcritical section(曲げ降伏位置)を柱フェースからスパン中央寄りに移行させたフラットプレート構造(以後、改良型フラットプレート構造と称す)の考案・開発を行った。

この改良型フラットプレート構造(図-1)は、柱との接合部において直交する2方向のフラットプレートの降伏位置が交差しないため、2方向入力時の構造性能の向上が期待できる。

本報では、改良型フラットプレート構造の開発において行ったフラットプレート・柱接合部の構造性能確認実験、およびその実験結果に基づいて考案したフラットプレートの復元力特性の評価手法について報告する。

## 2. フラットプレート・柱接合部性能確認実験

## 2.1 実験概要

フラットプレート構造の性能を確認するために、フラットプレート・柱接合部を対象に実験を行った。

既往研究<sup>1),2)</sup>より、フラットプレートの有効幅比(有効幅比:フラットプレート幅/柱幅)が4以上では、終局時にパンチング破壊を生じる可能性が大きいため、本実験の試験体では有効幅比を3とし、改良型の場合、critical sectionの位置を、2方向入力時に交差しないように、柱フェースから直交するフラットプレートの幅分スパン中央寄りに移行させた位置(柱芯から $1.5 \times cD$ ( $cD$ :柱せい))に設定した。

試験体は4体で、既往研究を参考に試設計した30階建フラットプレート構造建物の2階と26階のフラットプレート・柱接合部を対象とした2/3縮尺モデルを3体、柱を壁柱としたものを1体とした。

試験体諸元を表-1に、配筋状況を図-3に示す。

2階対象試験体は、在来型(FP60N)と、改良型(FP60I)の2体である。26階対象試験体は2階対象試験体よりもコンクリート強度が低い改良型(FP30I)1体であり、柱を壁柱に置き換えた場合(FP

\*1 (株)大林組技術研究所構造第一研究室 (正会員)

\*2 (株)大林組技術研究所構造第三研究室副主任研究員

\*3 (株)大林組技術研究所構造第三研究室室長 工博(正会員)

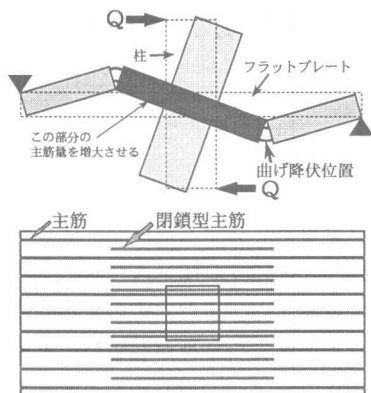


図-1 改良型フラットプレート構造

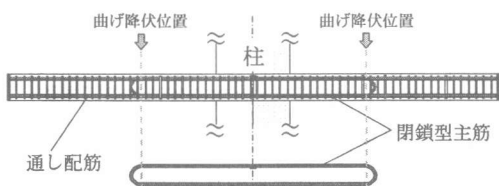


図-2 閉鎖型主筋

表-2 コンクリートの力学的性状

試験体	コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
FP60N	Fc60	57.1	29.7	3.11
FP60I		61.1	32.8	4.22
FP30I	Fc30	32.5	26.1	2.67
FP30IW		33.6	25.1	2.80

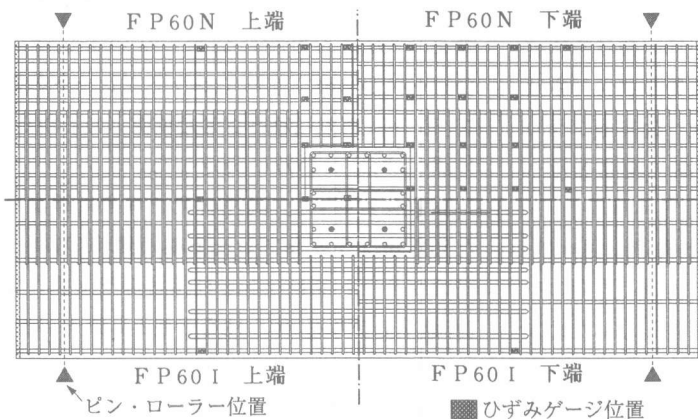


図-3 試験体配筋状況

30IW)もFP30Iと同じコンクリート強度にした。

改良型フラットプレートの試験体において、増大させる主筋はSBR溶接で閉鎖型(構造的には必ずしも閉鎖型の主筋でなくても良い)とし、通し配筋された主筋の間に入れ込む形とした。閉鎖型主筋を図-2に示す。

表-1 試験体諸元

試験体名	コンクリート	柱			フラットプレート		
		形状 B×D (cm)	軸方向力 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋量	鉄筋材質	形状 B×D (cm)	鉄筋量
FP60N						主筋: 上端 5-D19 (pt=1.84%) 下端 0-D19 (pt=1.47%)	
FP60I	Fc60	65 × 65	56	主筋: 20-D25 (pg=2.40%) フープ: 4-D10@65 (pw=0.67%)	主筋: SD390 フープ: SD295	主筋: 上端 0-D22 (pt=0.99%) 下端 8-D22 (pt=0.79%) 接合部周り 上端 0-D22 14-D25 (pt=2.81%) 下端 8-D22 14-D25 (pt=2.61%)	主筋: SD390 スチール フープ: SD295
FP30I				主筋: 12-D25 (pg=1.44%) フープ: 4-D10@65 (pw=0.67%)		主筋: 上端 8-D19 (pt=0.59%) 下端 8-D19 (pt=0.59%) 接合部周り 上端 1-D19 (pt=1.55%) 下端 1-D19 (pt=1.55%)	
FP30IW	Fc30	40 × 106	27	主筋: 12-D19 (pg=0.81%) フープ: 4-D10@65 (pw=0.67%)		主筋: 上端 8-D19 (pt=0.59%) 下端 8-D19 (pt=0.59%) 接合部周り 上端 1-D19 (pt=1.55%) 下端 1-D19 (pt=1.55%)	pw=0.22%

表-3 鉄筋の力学的性状

種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	試験体
D25	428	640	196	全試験体柱主筋 FP60I 閉鎖型主筋
D19	429	639	198	FP60N
D19	430	630	196	FP30I
D19	428	638	200	FP30IW
D22	406	607	196	FP60I
D10	355	522	194	柱 HOOP 筋 フラットプレート横補強筋

コンクリートおよび鉄筋の力学的性状を表-2, 3に示す。

載荷は図-4に示すように、柱端部に取付けた200tジャッキ4台で逆対称荷重を与えることにより行った。柱の軸方向力はアンボンドPC鋼棒32φを用いて作用させた。加力サイクルは柱の層間変形

角 R(加力点位置の変位を加力点間距離で除して求めた)が±1/1000で1サイクル, ±1/200, ±1/100, ±1/75, ±1/50, ±1/25でそれぞれ2サイクル載荷し、その後正側で1/15まで載荷した。

## 2.2 実験結果

### (1) 破壊経過

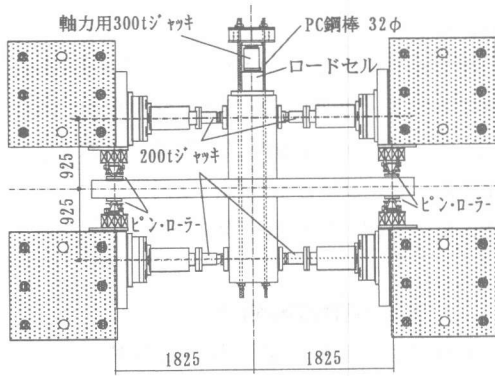


図-4 加力装置図

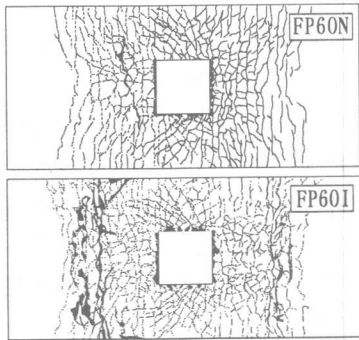


図-5 ひびわれ状況 (R=1/25)

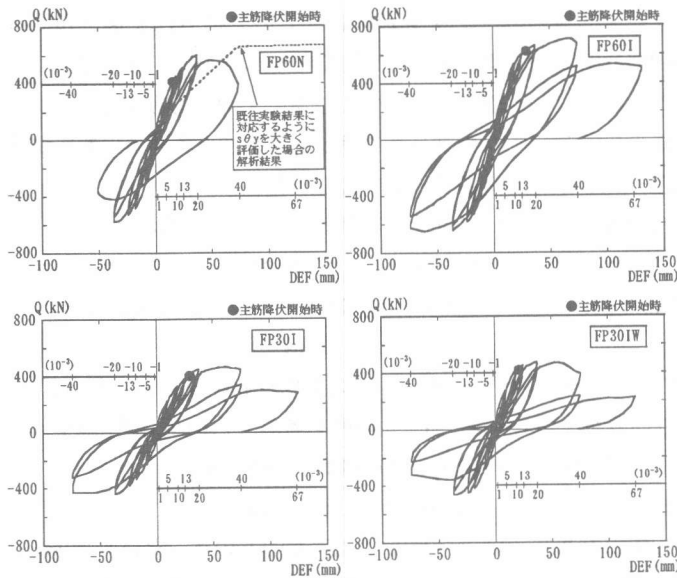


図-6 柱せん断力～層間変位関係

表-4に実験結果一覧, 図-5にFP60NとFP60IのR=1/25時のフラットプレート上端のひび割れ状況を示す。全試験体ともR=1/1000の加力サイクル時にフラットプレートの柱フェース付近に

表-4 実験結果一覧

試験体	初期剛性 (kN/mm <sup>2</sup> )	ひび割れ発生荷重 (kN)	ひび割れ発生変形角 (rad)	鉄筋降伏開始荷重 (kN)	鉄筋降伏開始変形角 (rad)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変形角 (rad)
FP60N	9.38	59.2	1/2930	431	1/108	600	1/50
FP60I	10.62	39.3	1/5000	623	1/63	710	1/27
FP30I	7.94	38.9	1/3780	401	1/63	462	1/30
FP30IW	8.37	40.2	1/3850	419	1/89	474	1/50

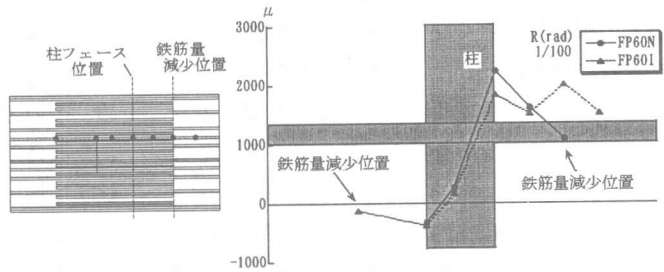


図-7 主筋ひずみの材軸方向分布 (R=1/100)

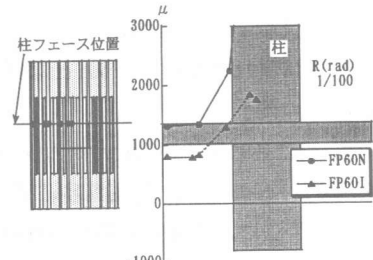


図-8 主筋ひずみの材軸直交方向分布 (R=1/100, 柱フェース位置)

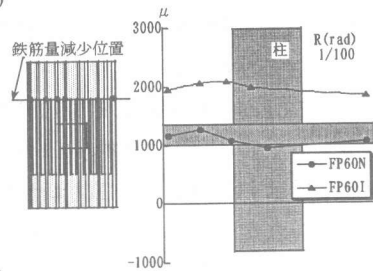


図-9 主筋ひずみの材軸直交方向分布 (R=1/100, 鉄筋量減少位置)

曲げひび割れが発生した。その後, FP60Nは柱フェース端部より斜め45度方向にひび割れが順次発生し, R=1/108で柱フェース位置の主筋が降伏した。また, R=1/25の1サイクル目の加力中に

柱フェース位置でのコンクリートの圧壊により急激に耐力が低下し、柱とフラットプレートが一体として挙動しなくなったため、そのサイクルで加力を中止した。

FP60Iは、曲げひび割れ発生後、鉄筋量減少位置まで順次曲げひび割れが生じた。その後、鉄筋量減少位置のひび割れ幅が増大し、その位置で $R=1/63$ の時に柱幅内の主筋が降伏し、続いて柱幅外の主筋も順次降伏した。その後、柱フェース位置で柱幅内の主筋が降伏し、その位置での損傷が大きくなり、 $R=1/25$ の繰返しサイクル時に耐力低下した。これは、柱幅内の主筋が柱フェース位置で曲げ降伏しなければ、より安定した復元力特性を得られるものと考えられる。

FP30I, FP30IWはFP60Iと同様な破壊経過であったが、FP30IWでは、鉄筋量減少位置よりも柱フェース位置の方がやや先に降伏し、柱とフラットプレートが一体として挙動しなくなった。ひび割れの傾向はFP60Iとほぼ同じであった。

図-6に各試験体の柱せん断力～層間変位関係を示す。FP60Nには、既往実験結果<sup>1), 2)</sup>に対応した評価手法による復元力特性の解析結果(3章で後述)も示す。図-6をみると、 $R=1/25$ の1サイクル目に急激に耐力低下したFP60Nに比べ、FP60Iの方が $R=1/25$ の1サイクル目まで安定している。FP30Iの変形性状はFP60Iとほぼ同様であった。

## (2) 主筋ひずみ分布

図-7にFP60NとFP60Iの $R=1/100$ 時のフラットプレート主筋(柱幅内)ひずみの材軸方向分布を比較して示す。FP60Nでは柱フェース位置のひずみが最も大きく、critical sectionは柱フェース位置と考えられる。FP60Iでは柱フェース位置と鉄筋量減少位置の2点でひずみが卓越しており、ほぼこの分布状態のまま鉄筋量減少位置の主筋が先に降伏した。

$R=1/100$ 時の主筋ひずみの材軸直交方向分布を、図-8は柱フェース位置、図-9はFP60Iにおける鉄筋量減少位置で、FP60NとFP60Iとを比

較して示す。

柱フェース位置における主筋ひずみは材軸直交方向では、FP60N, FP60Iとも柱から離れるほど減少している。FP60Iの鉄筋量減少位置では柱幅外の位置のひずみも柱幅内と同程度であり、分布形はほぼ一定の形を保ち推移している。

## 3. 復元力特性の評価手法

本章では、実験結果に基づき考案した、フラットプレート構造の復元力特性の評価手法について述べる。

フラットプレートの幅は柱幅より大きいため、その全幅が均一な応力状態とはならない。また改良型フラットプレートの材軸方向の断面性状は均一ではない。これらを考慮してフラットプレートを分割し、分割された各要素の断面性能を評価して1本の線材モデルに置換する。

なお、せん断変形は弾性とし、曲げ変形の塑性性状は材端剛塑性バネで表す。

### 3.1 分割要素の断面性状

フラットプレートの分割方法を図-10に示す。幅方向は柱幅内外で3分割し、材軸方向は鉄筋量の減少する位置において分割した。

分割したフラットプレート各要素の断面性状を以下に示す方法で算出した。

(a) 曲げひび割れモーメント  $M_c$

$$M_c = c \sigma_t \cdot Z_e \quad (\text{N} \cdot \text{mm})$$

$c \sigma_t$  : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$$c \sigma_t = 0.56 \sqrt{\sigma_B}$$

$\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$Z_e$  : 鉄筋を考慮した断面係数 (mm<sup>3</sup>)

(b) 曲げひび割れ時曲率  $\phi_c$

$$\phi_c = M_c / (E_c \cdot I_e) \quad (\text{mm}^{-1})$$

$E_c$  : コンクリートのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$I_e$  : 鉄筋を考慮した断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)

(c) 曲げ降伏モーメント  $M_y$

$$M_y = a_t \cdot s \sigma_y \cdot j \quad (\text{N} \cdot \text{mm})$$

$a_t$  : 引張鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$s \sigma_y$  : 引張鉄筋の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$j$  :  $7/8d$  ( $d$ :有効せい) (mm)

(d) 曲げ降伏時の曲率  $\phi y$

曲げ降伏時の曲率  $\phi y$  ( $\text{mm}^{-1}$ ) は塑性曲げ理論により求める。

(e) 降伏時の塑性回転角  $\theta y$

$$\theta y = B \theta y + s \theta y$$

$B \theta y$  : 塑性性状による回転角

・(A), (C) 要素: 反曲点をスパン中央と仮定

$$B \theta y = \frac{L_1}{6} \cdot \left(1 - \frac{Mc}{My}\right) \cdot \left(2 + \frac{Mc}{My}\right) \cdot \left(\phi y - \frac{My}{Mc} \cdot \phi c\right)$$

・(B) 要素: 図-11の灰色塗りの台形部分の面積による端部の塑性回転角

$$B \theta y = \frac{L_3}{4} \cdot \frac{1}{L_1 + L_3} \cdot (a \phi i + b \phi i) \cdot \left\{ \left( \frac{b \phi i - a \phi i}{b \phi i + a \phi i} \cdot \frac{L_3}{3} \right) + 2L_1 + L_3 \right\}$$

\* 在来型の場合は剛域を柱フェースとし、柱フェースでの曲げ降伏時の曲率を  $b \phi y$  として求める。

・(D) 要素: 図-12の灰色塗りの台形部分の面積による端部の塑性回転角 (曲げモーメントは一定と仮定)

$$B \theta y = \frac{L_2}{4} \cdot \frac{1}{L_1 + L_2} \cdot (c \phi i + d \phi i) \cdot \left\{ \left( \frac{d \phi i - c \phi i}{d \phi i + c \phi i} \cdot \frac{L_2}{3} \right) + 2L_1 + L_2 \right\}$$

\* 在来型の場合は剛域は無いものとし、柱芯での曲げ降伏時の曲率を  $d \phi y$  として求める。

$s \theta y$  : 引張鉄筋の降伏時の接合部からの抜け出しによる付加回転角

$$s \theta y = S / (d - X_n)$$

$d$  : 有効せい  $X_n$  : 降伏時の中立軸位置

$S$  : 引張鉄筋降伏時の抜け出し長さ

・(A), (C) 要素はなし

・(B) 要素の引張鉄筋の降伏時抜け出し長さ

$$S = 0.5 L' \cdot s \varepsilon y \quad (\text{mm})$$

$$L' = (s a t \cdot s \sigma y) / (s \psi t \cdot \tau a) \quad (\text{mm})$$

・(D) 要素の引張鉄筋の降伏時抜け出し長さ  
実験結果のひずみ分布より、引張鉄筋降伏時の定着長さは柱せいの1.5倍とする。

$$S = 0.5 L' \cdot s \varepsilon y \quad (\text{mm})$$

$$L' = 1.5 \times c D \quad (\text{mm})$$

引張鉄筋における

$s \varepsilon y$  : 降伏ひずみ,  $s a t$  : 断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$L'$  : 降伏時定着長さ (mm)

$s \psi t$  : 周長 (mm),  $c D$  : 柱せい (mm)

$s \sigma y$  : 降伏強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\tau a$  : 降伏時の平均付着応力度

$$\tau a = 2.68 \times s \varepsilon y \times 10^3 \quad \text{③) } (\text{N}/\text{mm}^2)$$

(f) 要素の降伏回転角  $\theta y'$

$$\theta y' = e \theta y + \theta y = e \theta y + B \theta y + s \theta y$$

$e \theta y$  : 反曲点を部材中央と仮定した場合の要素の弾性性状による回転角

$$e \theta y = a / 3 \cdot My / Mc \cdot \phi c$$

$a$  : 要素長さ (mm)

### 3.2 フラットプレートの線材置換方法

フラットプレートを分割した各要素の、曲げひび割れ後のモーメント分布を図-13のように仮定する。(A)と(C)要素の負担せん断力の比は、引張鉄筋量の比と同じであり、これらはすべて(B)要素に伝達されると仮定する。

$a_A$  : (A) 要素の引張鉄筋量 / 全断面の引張鉄筋量

$a_C$  : (C) 要素の引張鉄筋量 / 全断面の引張鉄筋量

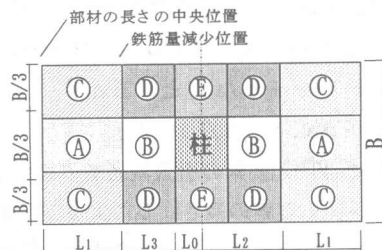


図-10 要素分割方法

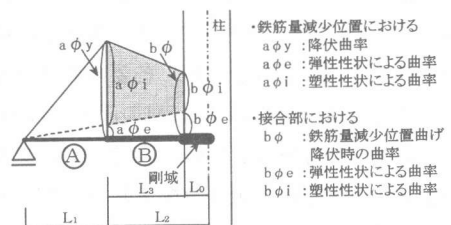


図-11 (A)要素降伏時の(A), (B)要素の塑性回転角 (改良型フラットプレートの場合)

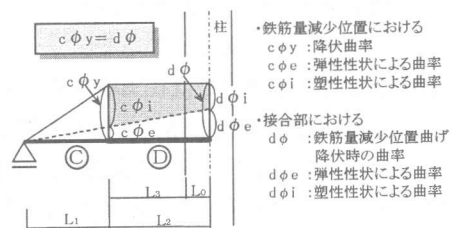


図-12 (C)要素降伏時の(C), (D)要素の塑性回転角 (改良型フラットプレートの場合)

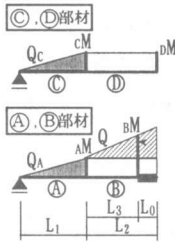


図-13 各要素のモーメント分布

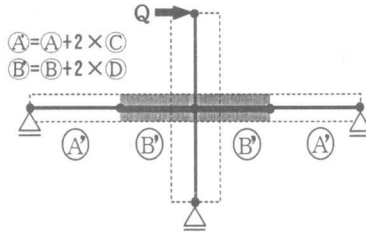


図-14 線材モデル

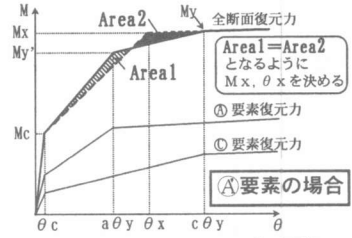


図-15 トリリニアモデル置換

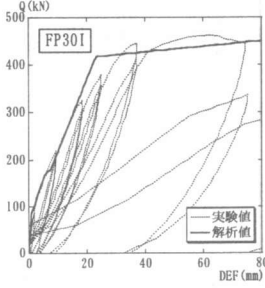
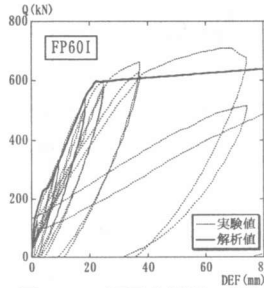
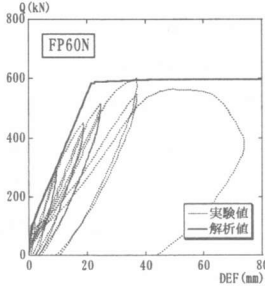


図-16 復元力特性の比較

$${}_AM = Q_A \cdot L_1 = a_A \cdot Q \cdot L_1$$

$${}_cM = Q_c \cdot L_1 = a_c \cdot Q \cdot L_1$$

②要素の接合部での曲げモーメント ${}_bM$ は

$${}_bM = {}_AM + Q \cdot L_3 = Q_A \cdot L_1 + Q \cdot L_3 = (L_1 + L_3/a_A) \cdot Q_A$$

$$\alpha = L_1 + L_3/a_A \quad \text{とすると}$$

$${}_bM = \alpha \cdot Q_A = (\alpha/L_1) \cdot {}_AM$$

ゆえに、 ${}_bM$ は①要素の引張鉄筋量の比 $a_A$ と曲げモーメント ${}_AM$ 、要素の長さ $L_1$ 、 $L_3$ によって定まる。

さらに、フラットプレートを1本の線材モデルに置換するため、①、③要素を合わせて①要素、②、④要素を合わせて②要素とし、復元力特性を合成する(図-14)。各要素の復元力特性算定後、図-15に示すArea1の面積とArea2の面積が等価になるように $M_x$ 、 $\theta_x$ を求め、フラットプレート全幅の復元力特性をトリリニアモデルで表す。

以上の復元力特性の評価手法による解析結果を、実験結果と比較して図-16に示す。解析結果は実験結果と良く対応している。

なお、この評価手法を既往実験結果<sup>1),2)</sup>に適用すると、ひび割れ後の剛性を大きく評価する。これは、フラットプレート主筋の接合部内における定着長が不足していたためで、 ${}_s\theta_y$ をかなり大きく評価しないと解析結果は実験結果と対応しない。既往実験結果に対応するように

${}_s\theta_y$ を大きく評価した値を用いた結果を本実験結果と比較すると、図-6のFP60Nの柱せん断力～層間変位関係に示したように、解析結果はひび割れ後の剛性を実験結果よりもかなり小さく評価した。

#### 4. まとめ

改良型フラットプレート構造を考案し、フラットプレート・柱接合部の構造性能確認実験を行った結果、改良型は在来型よりも優れた復元力特性を有しており、改良型フラットプレート構造は高層建物への適用が可能である。

さらに、実験結果に基づき考案したフラットプレート構造の復元力特性の評価手法は、実験結果と良好に対応することを確認できた。なお、本評価手法の適用範囲は、柱は矩形、フラットプレートは有効幅比が3以下で、接合部周りのパンチング破壊が先行しないものに限る。

#### 参考文献

- 1) 別所佐登志ほか：幅広はり・柱接合部の水平加力実験(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 445~448, 1988. 10
- 2) 伊藤光康ほか：幅広梁・柱部分架構の水平加力性状に関する実験研究, 戸田建設技術研究所所報 17, pp. 89~101, 1991
- 3) 森田司郎ほか：鉄筋コンクリート柱・はり接合部におけるはり軸筋の接合部からの抜け出しについて, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 1099~1100, 1972
- 4) 津田和明ほか：フラットプレート構造の高層建物への適用に関する研究(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 419~422, 1997; (その3), pp. 685~688, 1998