

柱とフラットプレートとのト字形接合部の 構造性能に関する実験研究

Experimental Study on Flat Plate Structure of Slab-Column Exterior Connection

中澤 敏樹* 井上 重信*
内井 栄二* 飛田 喜則*
森 浩二* 山内 豊英*

要 旨

フラットプレート構造物に水平力が作用した時の構造性能を把握する目的で、フラットプレートと外柱との接合部を想定したト字形接合部の加力実験を行った。実験の結果、全てのスラブ筋が降伏した時の最大ひび割れ幅は0.3～0.5mmとなり、除荷後も幅0.20～0.35mmのひび割れが残った。フラットプレートの構造性能は、スラブ部分を柱幅の3倍の幅を持つ偏平梁として取り扱い、柱幅に有効スラブ厚を考慮した領域とその外側の領域にわけて評価することによって、精度よく評価することができた。また、復元力特性は、履歴曲線をTAKEDAモデルを用いてモデル化することによって精度よく評価できた。

キーワード：フラットプレート／ト字形接合部／鉄筋コンクリート構造

1. はじめに

梁型が室内に突出しないフラットプレート構造は、室内のデザインや間取りを自由に計画することができることから、SIに対応した工法として注目を集めている。しかし、フラットプレート構造物が水平力を受けた場合の構造性能には不明な点が多い。

このような背景から、フラットプレート構造に水平力が作用した時の構造性能を確認するために、前報¹⁾ではフラットプレートと中柱との接合部を想定した十字形接合部の加力実験を行った。

本報では、フラットプレートと外柱との接合部の構造性能を確認するために、ト字形接合部の加力実験を行ったので、その結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 設定条件

フラットプレート構造の試験体を計画するにあたり、前報と同様に、他の耐震要素との併用を行わないフラッ

トプレート構造のみで計画された鉄筋コンクリート造6階建て（スパン長：7m×7m）の集合住宅の試設計を行い、スラブと外柱とのト字形接合部に要求される性能を設定した。構造計算の方法については、FEM解析によって求めたスラブと柱との接合部における応力状態を参考にして、スラブ部分を柱幅の3倍の梁幅を持つ偏平梁と見なすことによって、ラーメン架構形式として構造計算を行った。

実験の主な目的は、フラットプレートと柱とのト字形接合部について、強度、剛性および復元力特性を確認し、評価することである。

2.2 試験体

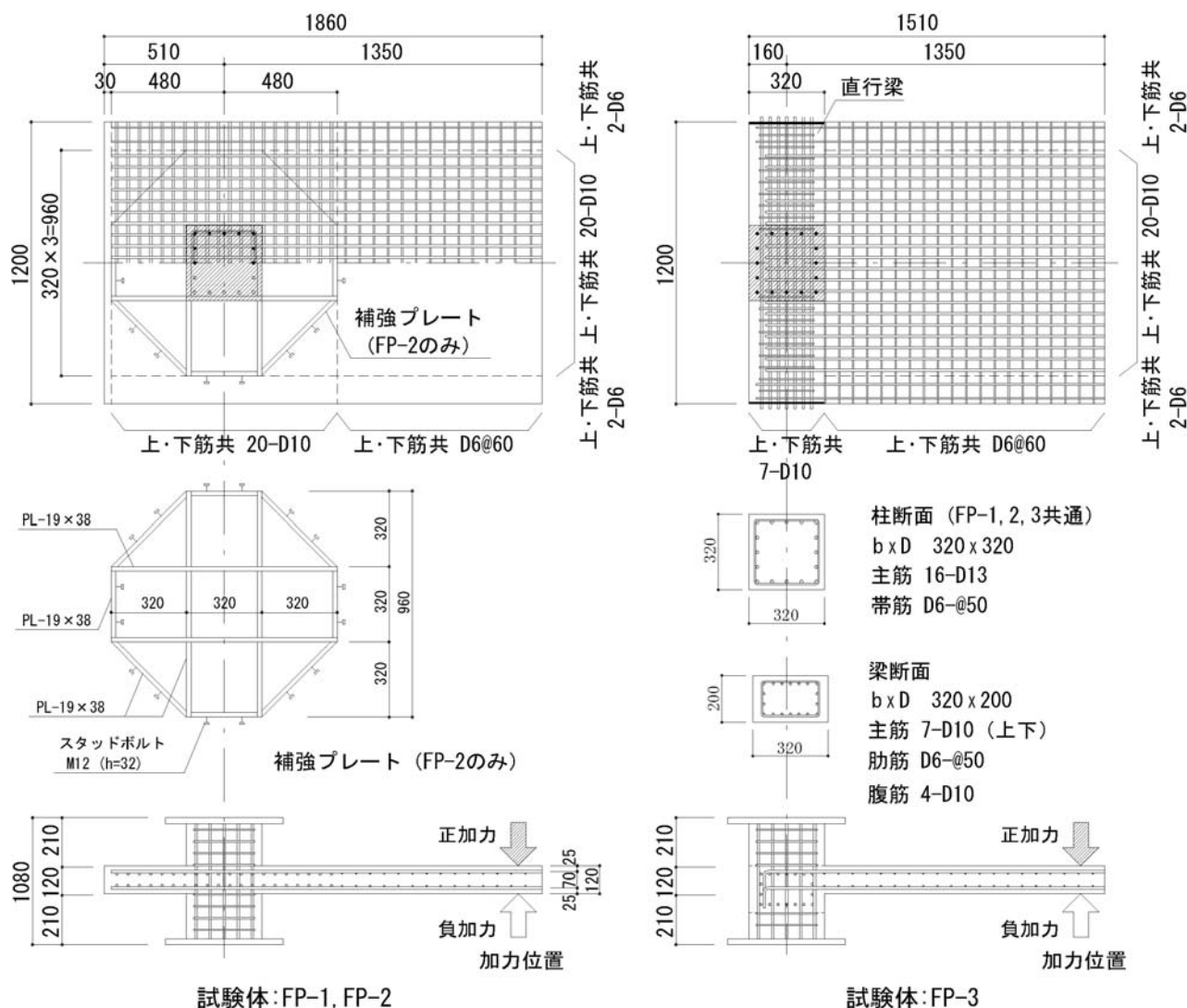
試験体の一覧を表-1に、試験体の形状と配筋を図-1に示す。試験体数は3体であり、これらは2.1項で示すモデル建物において応力が最大となる3階床スラブを対象とし、上下階の柱を含む接合部を1/2.5にスケールダウンしたものである。

FP-1は、外部にハネ出しスラブが取り付けくケースを想

表-1 試験体一覧

試験体名	特 徴	ス ラ ブ	柱	直 交 梁
FP-1	ハネ出しスラブ付き	スラブ厚：t=120 スラブ幅：B=1200 スラブ筋(上下筋共) 長辺方向：20-D10(+4-D6) 短辺方向：20-D10(+D6-@60) ※FP-3はD6-@60	b×D 320×320 主筋 16-D13 (pt=0.35%) 帯筋 D6-@50 (pw=0.33%)	—
FP-2	FP-1+補強プレート			
FP-3	ハネ出しスラブなし 直交梁付き			b×D 320×320 主筋 7-D10(上下) 肋筋 D6-@50 腹筋 4-D10

*構造研究グループ



図－１ 試験体の形状および配筋

定したものであり、応力計算から算出されたスラブ筋を柱幅の３倍の範囲に均等に配筋した試験体である。

FP-2は、図－１に示す八角形に加工した鋼製補強プレートを接合部のスラブ上筋と下筋との間に挟み込んだ試験体であり、形状およびスラブ筋の配置はFP-1と同じである。補強プレートは接合部において柱幅の３倍の範囲を補強できるような形状としており、プレートの外周部にはコンクリートスラブとの一体性を高める目的でスタッドボルトを取り付けている。

FP-3は、外部にハネ出しスラブが取り付けかず、代わりに柱幅と同幅の偏平梁が加力と直交する方向に取り付いた試験体であり、柱筋および加力方向のスラブ筋の配筋量はFP-1と同じである。

全ての試験体で、スラブ端の曲げ降伏が先行するように配筋等を計画しており、柱部分の破壊および柱とスラ

表－２ 材料特性

a) コンクリート

部 位	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²	ヤング係数 × 10 ⁴ N/mm ²
柱・スラブ	37.1	2.97	2.67

b) 鉄筋・鋼材

種 別	材 質	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 × 10 ⁴ N/mm ²
D6	SD295A	—	536.8	1.88
D10	SD295A	381.4	512.2	1.83
D13	SD295A	351.0	475.7	1.87
PL-19	SS400	286.7	436.1	2.03

ブとの接合部におけるせん断破壊、パンチング破壊は生じないような断面とした。

実験に用いたコンクリートおよび鉄筋・鋼材の材料特性を表－２に示す。

2.3 荷重計画

荷重装置を図-2に示す。加力は、上下柱の反曲点に相当する位置をピン支持し、柱に長期荷重に相当する $0.05bDf_c (= 190.0kN)$ の軸力を加えた状態で、左右のスラブの端部に取り付けた押し引き型油圧ジャッキを用いて行った。荷重に際して、上下柱のピン支持中心点を結んだ線に対する左右のスラブ加力点の傾きを部材角 R と定義する。

荷重スケジュールは、目標所定部材角 R を $\pm(5,10,20,30,40,50) \times 10^{-3}rad$ に設定し、正負交番繰返し荷重（各2サイクル）を行った。

計測は、部材角、接合部近傍のスラブの変形量、接合部の回転量、柱の軸方向変形量およびスラブに発生したひび割れ幅について行った。ひび割れ幅の測定については、スラブ筋が全て降伏した時点におけるスラブの主要な場所に発生したひび割れ幅を測定した後、同じひび割れについて荷重を0に戻した時のひび割れ幅を測定した。また、スラブ筋と柱筋の主要な位置にひずみゲージを貼り付けてひずみを測定した。

3. 実験結果

3.1 実験経過

図-3に各試験体の荷重-変形曲線を、図-4に実験終了時のスラブ上面のひび割れ発生状況を示す。ここで、荷重はスラブ自重（ $2.06kN$ ）を差し引いている。

全ての試験体で、第1サイクルの $R=5 \times 10^{-3}rad$ までに接合部近傍のスラブ面にひび割れが発生した。その後、加力直交方向のひび割れが、柱フェース位置から加力点方向へ向かって進展した。FP-1, 3と比較して、FP-2のひび割れは広範囲にわたって発生した。また、FP-1では $R=10 \times 10^{-3}rad$ 、FP-2, 3では $R=20 \times 10^{-3}rad$ で柱の角から

斜め方向のひび割れが発生した。

FP-1, FP-3については、 $R=10 \times 10^{-3}rad$ までに柱幅内にあるスラブ筋が降伏し、 $R=20 \times 10^{-3}rad$ までに最外端のスラブ筋まで全てのスラブ筋が降伏した後、 $R=\pm 30 \times 10^{-3}rad$ で最大荷重に達した。

FP-2では、 $R=10 \times 10^{-3}rad$ を超えた部材角で柱幅内にあるスラブ筋が降伏し、 $R=20 \times 10^{-3}rad$ までに最外端のスラブ筋まで全て降伏した後、 $R=\pm 40 \times 10^{-3}rad$ で最大荷重に達した。FP-2の最大荷重は、FP-1と比較して約30%増大した。補強プレートは、中央部のスラブ筋とほぼ同時に降伏歪みに達した。

全ての試験体で、 $R=50 \times 10^{-3}rad$ まで荷重は最大荷重の80%を下回ることにはなかった。

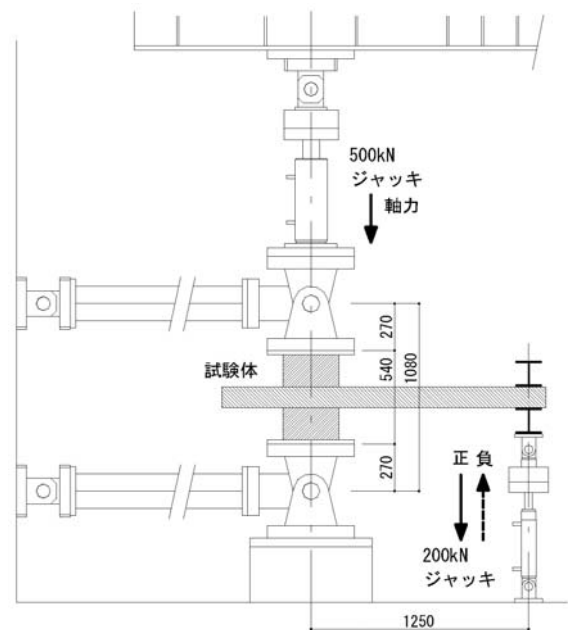


図-2 荷重装置

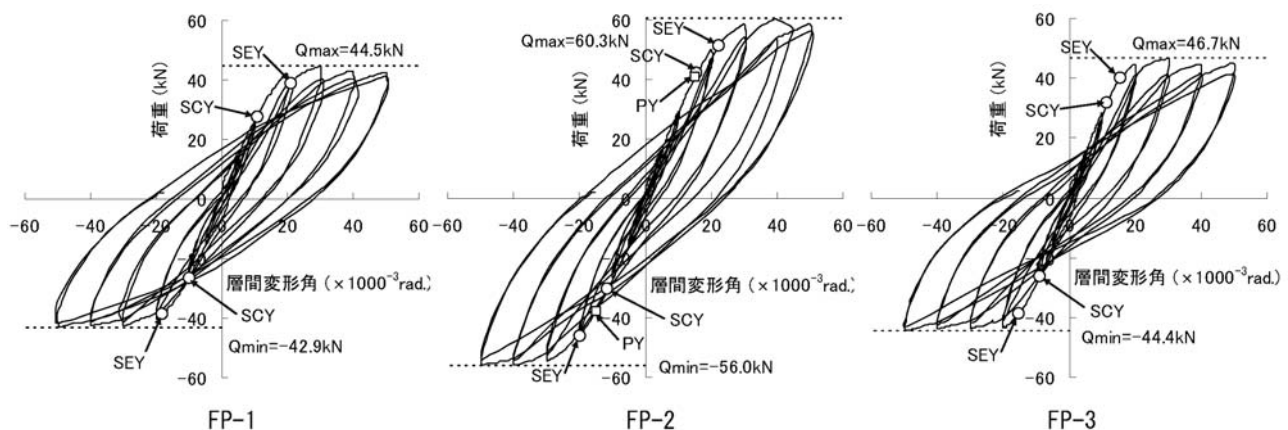
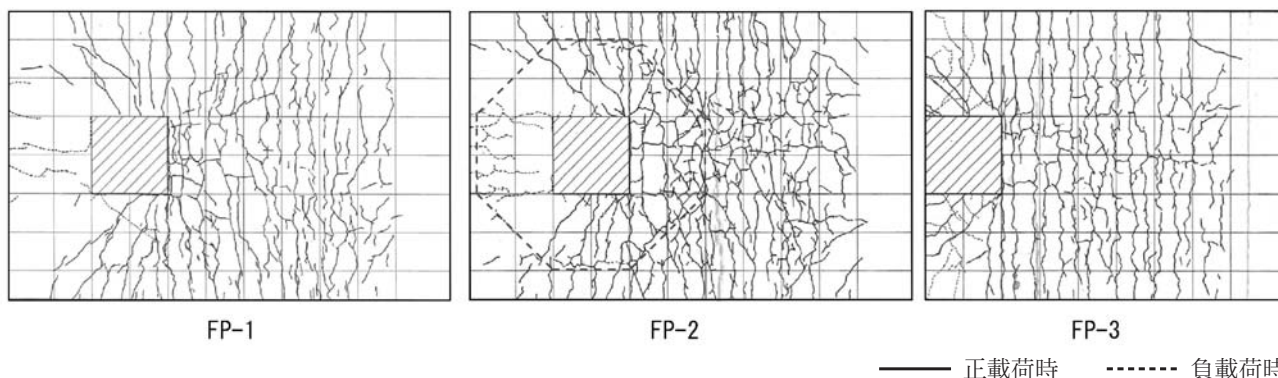


図-3 荷重-変形角
(SCY: 中央部スラブ降伏 SEY: 最外端スラブ筋降伏 PY補強プレート降伏)



図－４ 最終ひび割れ状況

3.2 接合部付近のスラブの変形量

各部材角におけるA, B点(図－５参照)に対するC, D点のねじれ量を図－６に示す。

FP-1とFP-2のねじれ量は、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで部材角に比例して大きくなっているが、 $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降での増加は小さい。また、両者に補強プレートの有無による差は見られない。FP-3のねじれ量は他の２体より小さく、 $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで部材角に比例して大きくなった。

3.3 スラブ筋降伏時および除荷時のひび割れ幅

図－５に示す接合部付近のスラブ面に発生した代表的なひび割れ(No.1～3)について、全てのスラブ筋が降伏したサイクルのピーク荷重時(３体とも $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$)のひび割れ幅と荷重を０に戻した除荷時のひび割れ幅を表－３に示す。

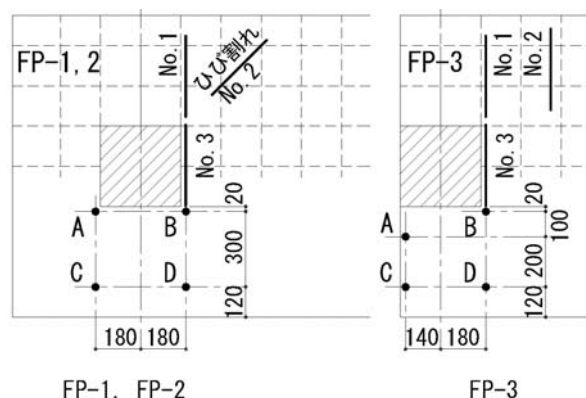
全ての試験体で、柱フェース位置のひび割れ(No.3)が最も大きくなり、降伏時の最大ひび割れ幅は $0.3 \sim 0.5 \text{mm}$ となった。除荷後のひび割れ幅は、補修が必要になると思われる $0.2 \sim 0.3 \text{mm}$ となった。また、除荷した時点の残留変形は、 $\text{FP-1} > \text{FP-2} \approx \text{FP-3}$ の順となった。

3.4 スラブ筋の歪み

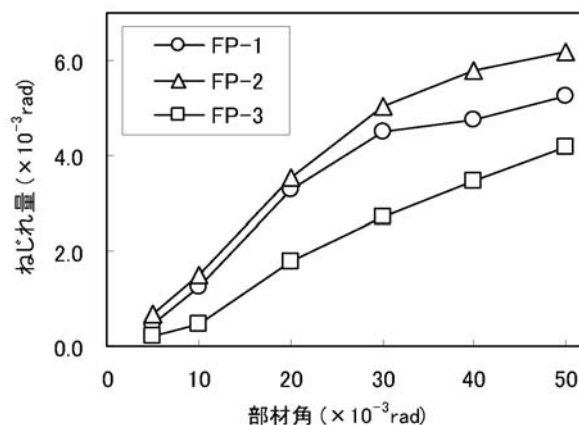
図－７に各部材角における長辺方向のスラブ筋の歪み分布を示す。

柱幅内に配筋されたスラブ筋A,Bについて、FP-1では $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ で柱フェース位置の歪みが降伏歪みに達し、柱から遠ざかるにつれて歪みも小さくなった。FP-2, 3では、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ で柱フェース位置から柱せいに相当する約 320mm の範囲にわたりスラブ筋が降伏歪みに達した。

柱幅外に配筋されたスラブ筋C,Dについては、３体とも $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ でほぼ降伏歪みに達した。柱フェースから約 320mm の位置では、FP-2の歪みがFP-1の値を上回った。最外端のスラブ筋Dについては、FP-3の歪みが他の２体の歪みを上回った。



図－５ ねじれ量、ひび割れ幅の測定位置



図－６ スラブ(柱の両側)のねじれ量

表－３ 降伏時および除荷時のひび割れ幅

試験体名			FP-1	FP-2	FP-3
降 伏 時	ひび割れ幅 (mm)	No.1	0.15	0.25	0.35
		No.2	0.25	0.30	0.25
		No.3	0.30	0.50	0.50
	部材角(×10 ³ rad)		20.00	20.00	20.00
除 荷 時	ひび割れ幅 (mm)	No.1	0.10	0.12	0.20
		No.2	0.10	0.15	0.10
		No.3	0.20	0.25	0.30
	部材角(×10 ³ rad)		7.76	6.85	6.96

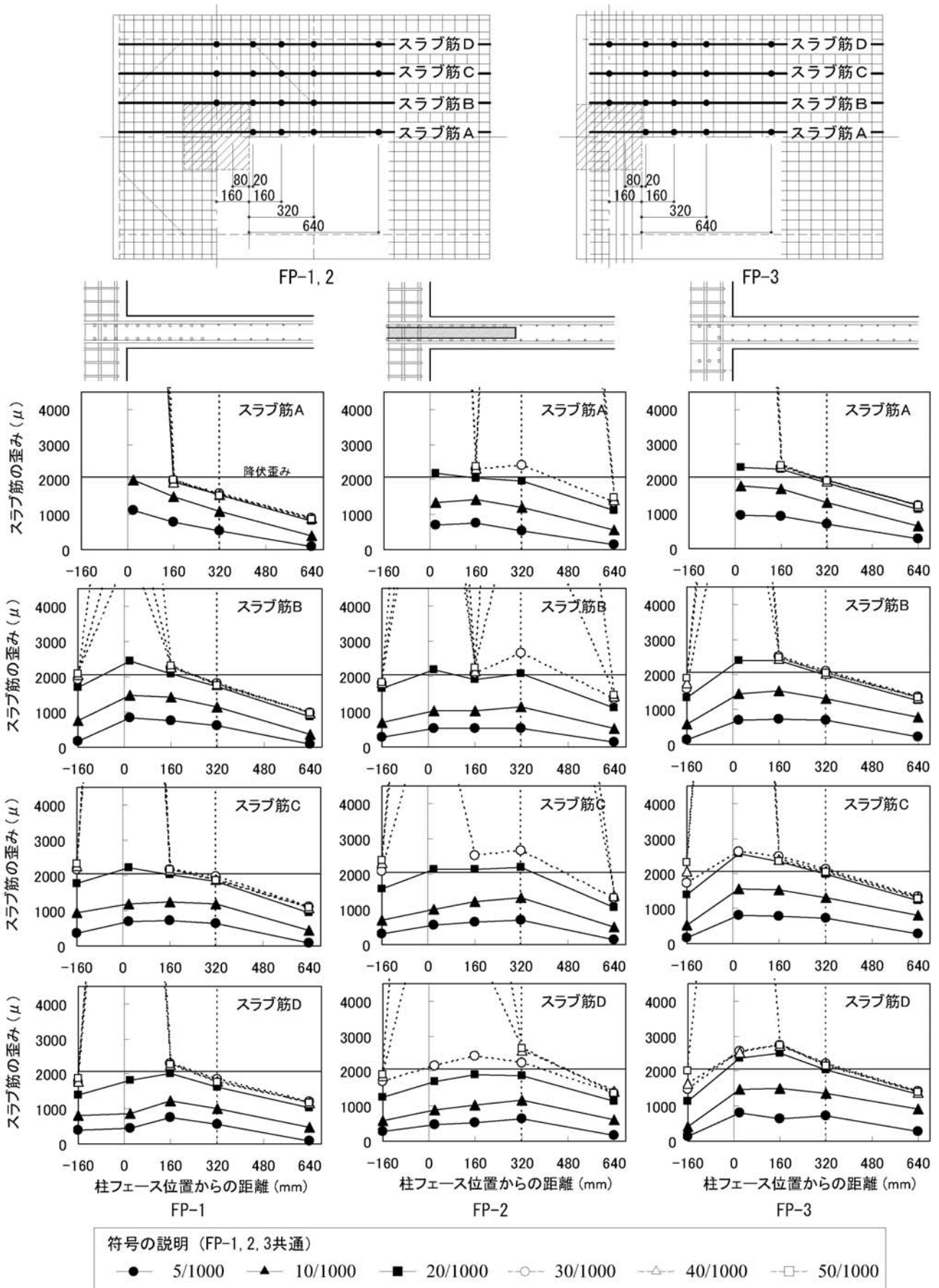


図-7 スラブ筋の歪み分布

4. 復元力特性の評価

4.1 構造特性値の評価

各試験体の構造特性値を評価するにあたり、図-8に示すようにフラットプレート部分を柱幅の3倍の幅を持つ偏平梁として取り扱う。この場合、偏平梁として考えたフラットプレートは、梁幅方向において均一な応力状態とならないことから、各領域の応力および変形性状を考慮して以下の3つ（A、B、C）の領域に分割して評価する。

領域A： 柱を含む幅が $b+d$ （ b ：柱幅、 d ：有効スラブ厚）の領域であり、偏平梁として取り扱う。

領域B： フラットプレート有効幅内における領域Aの外側の領域であり、偏平梁として取り扱う。

領域C： 加力方向に直交して柱に隣接する領域であり、ねじり部材として領域Bの応力を柱へ伝達する機能を持つ。

分割された各要素は、「柱＋領域A」（以下、架構A）と「柱＋領域C＋領域B」（以下、架構B）の2種類の架構として取り扱い、それぞれのスケルトンカーブをトリリニア型として評価する。最終的には、図-9に示すようにそれらを合成して、フラットプレート全体をテトラリニア型のスケルトンカーブを持つ1本の線材として評価する。

接合部に補強プレートを組み込んだ試験体については、補強プレートとRCスラブは大変形時まではほぼ一体となって挙動すると考えられることから、補強プレートのスケルトンカーブを別途算出し、上記のテトラリニア型スケルトンカーブに加算して評価する。

以下、(1)～(3)にフラットプレート部分の各構造特性値（初期剛性、曲げひび割れモーメント、曲げ降伏モーメント、曲げ降伏時部材角）の算出方法を示す。

(1) 初期剛性、曲げひび割れモーメント

領域A,Bの各初期剛性（ S ）および曲げひび割れモーメント（ M_c ）については、「RC規準」²⁾に準拠して一般のRC造梁と同様に評価する。

(2) 曲げ降伏モーメント

領域A,Bの各曲げ降伏モーメント（ M_y ）は、文献³⁾をもとに柱フェイス位置（領域Bでは、領域Cとの境界位置）を降伏位置として「RC規準」に準拠して算出し、両者を以下に示す曲げ降伏時部材角を考慮して加算する。

補強プレートを組み込んだFP-2については、上記の M_y に補強プレートの曲げ降伏モーメント（ M_{ys} ）を、以下に示す曲げ降伏時部材角を考慮して加算する。

(3) 曲げ降伏時部材角

架構Aの曲げ降伏時部材角（ R_y ）は、「RC規準」に示される降伏時の剛性低下率（ α_y ）を用いて評価する。

架構Bの曲げ降伏時部材角（ R_y ）は、領域Bの曲げ降伏時部材角に領域Cのねじれによる回転剛性（ GJ ）を考慮し、同様に α_y を用いて評価する。

領域Aのスラブ筋が降伏した直後に補強プレートも降伏していることから、補強プレートの曲げ降伏時部材角は安全側に架構Bの曲げ降伏時部材角と同じとする。

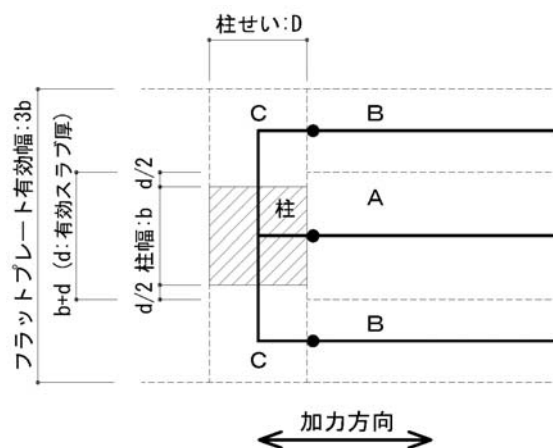


図-8 接合部のモデル化

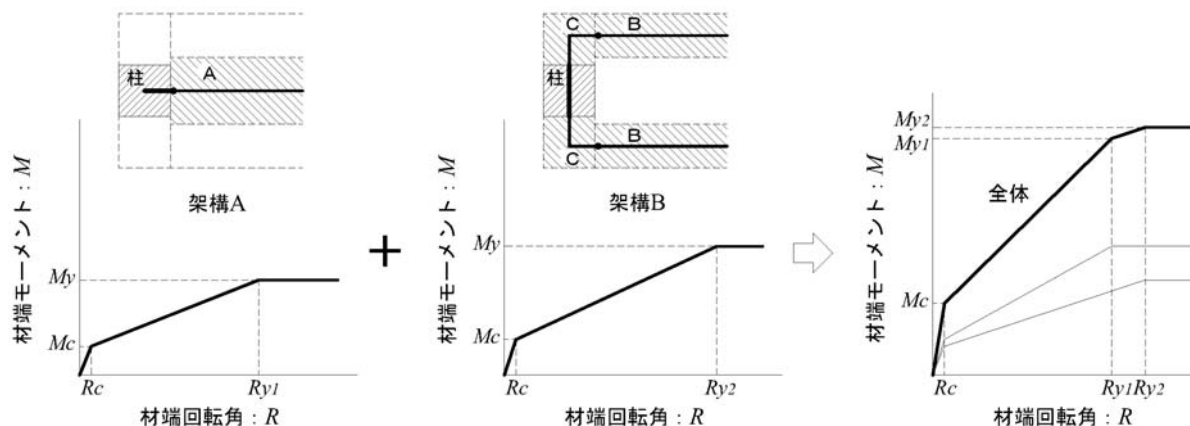


図-9 スケルトンカーブの合成

4.2 構造特性値の計算値と実験値との比較

4.1項によって算定した各構造特性値と実験値との比較を表－4および図－10に示す。比較にあたり、部材角Rにはスラブ（フラットプレート）の変形の他に柱の変形や接合部の回転等が含まれていることから、曲げ降伏時部材角の実験値として、部材角Rではなくフラットプレート変形 R_{fp} （接合部の回転角に対するスラブ加力点の傾き）を用いた。参考として、前報¹⁾で行った十字形接合部実験の試験体FP-Aについて、同様の評価方法によって算定した構造特性値と実験値との比較を表中に示す。FP-Aは、柱とスラブの断面および配筋等がFP-1と同一の試験体である。

同表より、FP-1, 3の最大強度は精度良く評価されているが、FP-2の最大強度は計算値を実験値が大幅に上回る結果となった。

4.3 履歴曲線のモデル化

履歴曲線のモデル化に際して、履歴曲線を3折れ線のTAKEDAモデルにてあらわすこととする。各折れ点となるひび割れ耐力および降伏耐力は4.1項に準じて算定し、除荷時の剛性は $\gamma=0.4$ とする。ただし、今回提案するスケルトンカーブは第1降伏点と第2降伏点を持つテトラリニア型の4折れ線となるため、モデル化は4折れ線型スケルトンカーブをエネルギー吸収能力において等価なトリリニア型スケルトンカーブに置き換えて評価した。

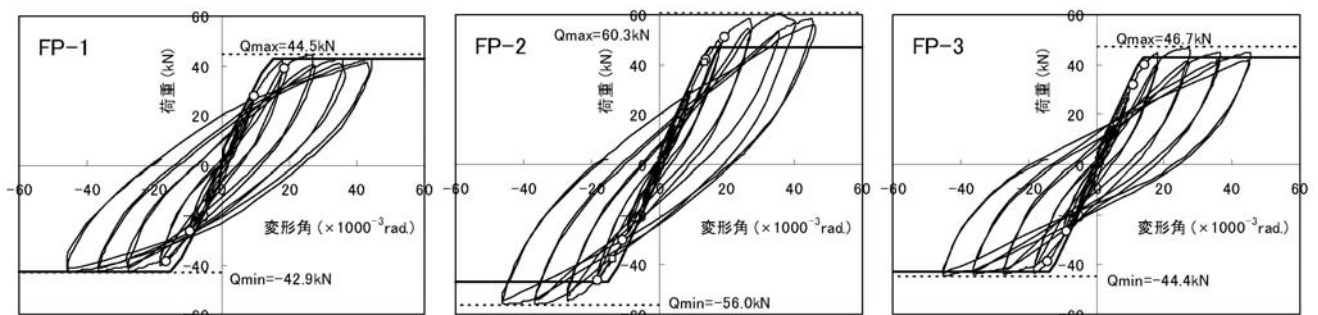
上記に示す方法によってトリリニア型に置き換えられたスケルトンカーブの復元力特性（TAKEDAモデル）と実験値との比較を図－11に示す。

次に、モデル化の妥当性を検証するために、各サイクルの履歴曲線から算定した試験体の履歴吸収エネルギー量を図－12に、等価粘性減衰定数を図－13に示す。

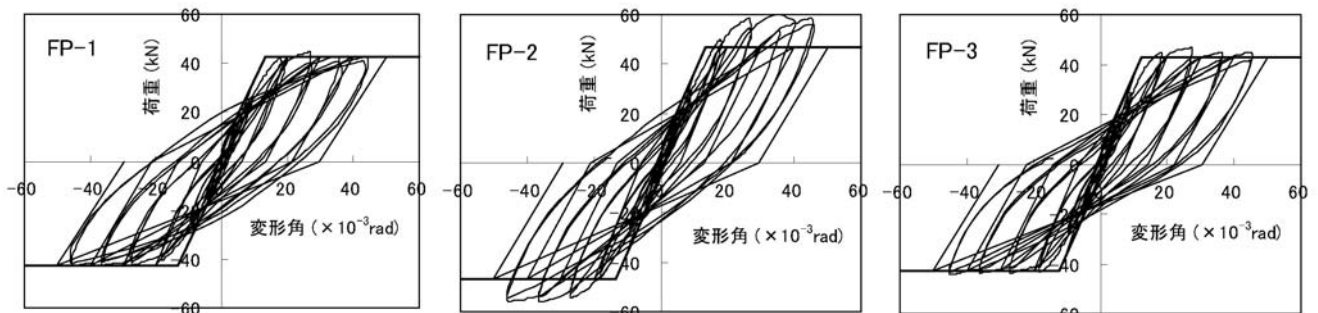
表－4 構造特性値の計算値と実験値の比較

試験体名	初期剛性(kN/rad)		ひび割れ強度(kN)		最大強度(kN)			スラブ筋降伏時部材角($\times 10^3$ rad)					
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値		計算値	スラブ筋A, B, C, Dの実験値				計 算 値	
					正加力	負加力		A	B	C	D	柱部	側部
FP-1	6348	10159	6.3	7.2	44.5	-42.8	42.7	-9.8	-10.5	-15.2	-18.0	12.0	15.2
FP-2	4925		4.5	7.4	60.3	-55.9	46.8	-11.4	-15.0	18.1	-19.5	12.0	15.2
FP-3	4475		3.9	7.2	46.7	-44.4	42.7	-9.0	-12.5	14.2	14.8	12.0	13.8
FP-A	7643	11681	16.4	7.6	42.6	-39.4	40.0	-8.3	11.2	15.4	15.2	10.0	14.1

注：初期剛性の実験値は、0.5/1000rad.における剛性とした。



図－10 スケルトンカーブの計算値と実験値との比較



図－11 TAKEDAモデルによる履歴曲線の計算値と実験値との比較

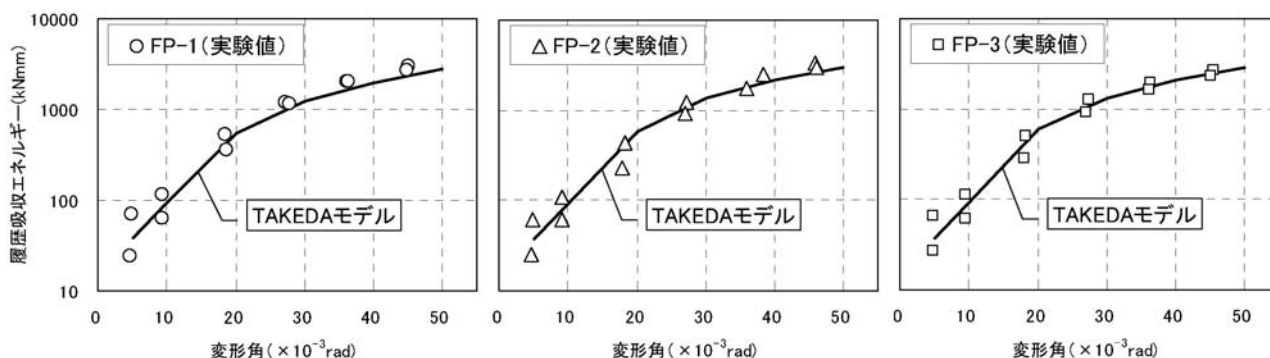


図-12 履歴吸収エネルギー

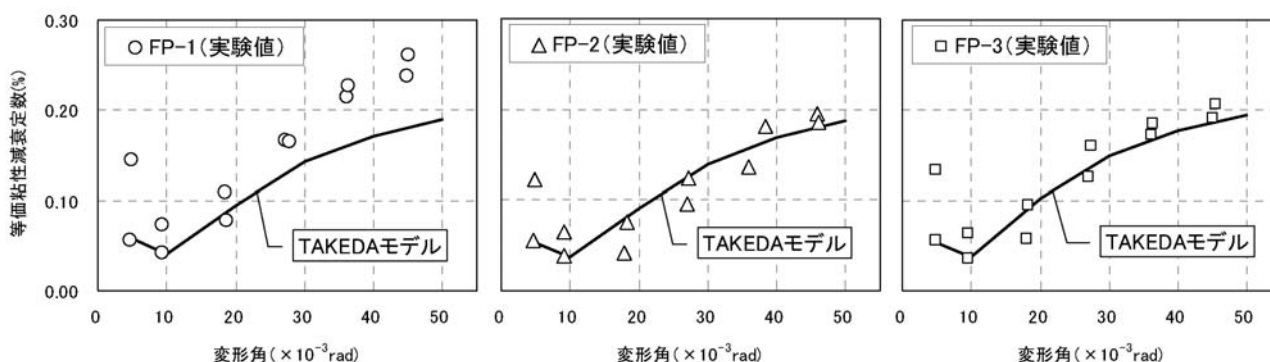


図-13 等価粘性減衰定数

図中には、試験体の履歴曲線をTAKEDAモデル ($\gamma = 0.4$) として算定した時の履歴吸収エネルギーと減衰定数を記入している。

履歴吸収エネルギーは、各試験体ともに変形角が大きくなるに従って増加しており、TAKEDAモデルにより精度よく評価できた。

等価粘性減衰定数についても、各試験体ともに変形角が大きくなるに従って増加した。FP-2、FP-3についてはTAKEDAモデルにより精度よく評価できたが、FP-1では変形角が大きくなるに従い実験値がTAKEDAモデルによる計算値を大きく上回った。

5. まとめ

今回の実験によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 柱幅内にあるスラブ筋が降伏した後、端部のスラブ筋が順次降伏し、 $R=20 \times 10^3 \text{ rad}$ までに最外端のスラブ筋まで全て降伏した。
- 2) 全てのスラブ筋が降伏した時の最大ひび割れ幅は $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$ となり、除荷後も $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ のひび割れが残った。
- 3) フラットプレートの構造特性値は、フラットプレート部分を柱幅の3倍の幅を持つ偏平梁として取り扱い、柱幅に有効スラブ厚を考慮した領域とその外側の領域にわけて評価することによって、精度良く評

価することができた。

- 4) 履歴吸収エネルギーは、履歴曲線をTAKEDAモデルを用いてモデル化することによって精度よく評価できた。等価粘性減衰定数についてもTAKEDAモデルによって精度よく評価できたが、FP-1の等価粘性減衰定数は、変形角が大きくなるに従い実験値がTAKEDAモデルによる計算値を大きく上回った。

[参考文献]

- 1) 中澤敏樹、他：柱とスラブの接合部を補強したフラットプレートの構造性能に関する実験研究、浅沼組技術研究所報、No.15、2003
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1999年版
- 3) 松崎育弘、他：幅広梁・柱部分架構の復元力特性に関する実験研究、コンクリート工学年次論文集、10-3、pp.501-506、1988
- 4) 山中久幸、他：柱とフラットスラブからなるラーメン架構の水平加力実験（その1 実験概要および荷重-変形関係、その2 スラブの変形・ひずみ性状および弾性波速度の推移、その3 復元力特性の評価）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、pp.723-728、2001