

論文 マクロモデルによる水平荷重に対するフラットプレート架構の弾塑性解析

太田 義弘^{*1}・ト部 藍^{*2}・太田 博章^{*3}・川合 拓^{*4}

要旨：本研究は、壁柱とフラットプレートからなる架構における地震時を想定した水平荷重を受けた場合の壁柱とフラットプレートの応力伝達機構を明らかにすることを目的とする。既報¹⁾では、直交壁を有する壁柱・フラットプレート部分架構試験体に対して、提案したマクロモデルによって弾塑性解析を行い、モデルの妥当性を検証した。本報では、直交壁の無い壁柱・フラットプレート部分架構試験体を加えてマクロモデルによる弾塑性解析をして、水平荷重と層間変形角の包絡曲線およびスラブ主筋の応力分布に対して実験結果との比較検討を行い、妥当性を検証した。

キーワード：壁柱、フラットプレート、マクロモデル

1. はじめに

フラットプレート構造は、梁型が無いことにより室内空間の利用に対する自由度が高いという長所を有している。近年では室内空間の可変性に対するニーズが高まっていることや免震・制震技術の進歩により、住宅を中心にフラットプレート架構を採用する建物が増加している。一方、本構造は柱周りのせん断破壊（パンチング破壊）による脆性的な壊れ方をする場合があることから、地震の多い日本において実建物に適用する場合には十分に注意して設計する必要がある。

本構造は 20 世紀初頭にアメリカのターナーやスイスのマイヤールにより研究が始められたが、水平力に対する剛性および耐力に関して非線形性を考慮して評価する研究は非常に少ない^{2), 3), 4)}。そこで既報では Hawkins らによる Stub Beam Model⁴⁾の基本的な考え方を踏襲しながら新たなマクロモデルを提案し、直交壁を有する壁柱・フラットプレート部分架構試験体に対して弾塑性解析を行い、柱せん断力と層間変形角関係においてその妥当性を検証した¹⁾。

本報では、既往の直交壁の無い壁柱・フラットプレート部分架構実験結果⁵⁾を加えて本マクロモデルを用いた弾塑性解析を行い、柱せん断力と層間変形角関係における妥当性を示すとともに、スラブ主筋の降伏時期および有効幅に関してもモデルの妥当性を検証して、本構造の応力伝達機構を明らかにすることを目的とする。

2. マクロモデルの概要

以下に提案するマクロモデルの概要を示す。(詳細は既往文献を参照¹⁾) 図-1 にフラットプレート架構の応

力伝達機構、図-2 にマクロモデルの構成を示す。フラットプレート架構に水平力が加わる場合、柱からの断面力は、(a)柱前後面でのスラブの曲げと(b)柱側面のスラブのねじりによって、柱からスラブに伝達される。提案するマクロモデルは、Hawkins らによる Stub Beam Model⁴⁾の考え方を踏襲し、この応力伝達機構を適切に表現可能なモデルとなっている。本モデルは、図-2 に示すようにスラブは曲げ要素とねじり要素、先端要素の 3 要素から構成される。柱とスラブの接合部は剛体、柱は基本的には弾性として考える。また、加力方向に対して直交する壁は具体的にはモデル化しない。

図-3 にマクロモデルによる解析フロー、図-4 に各要素での力の釣合、図-5 に曲げ要素とねじり要素の変形の適合状態を示す。マクロモデルによる解析は、以下の順序で行う。まず、断面解析による曲げ要素の曲率と曲げモーメントの関係を算出した後、仮定したねじり要素の有効長さとして曲げモーメント分布に対して、力の釣合条件により各断面力を算出する。次に算出した断面力に対して曲げ要素およびねじり要素の変形を算出し、曲げ要素とねじり要素の交点の変形が適合するまで、ねじり

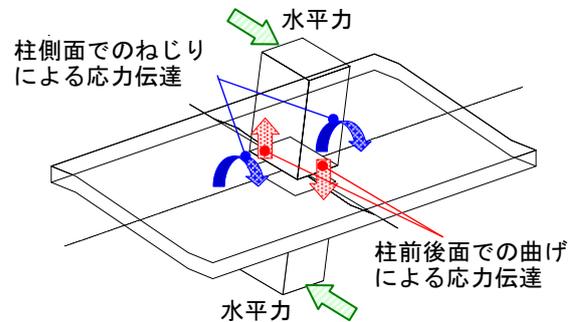
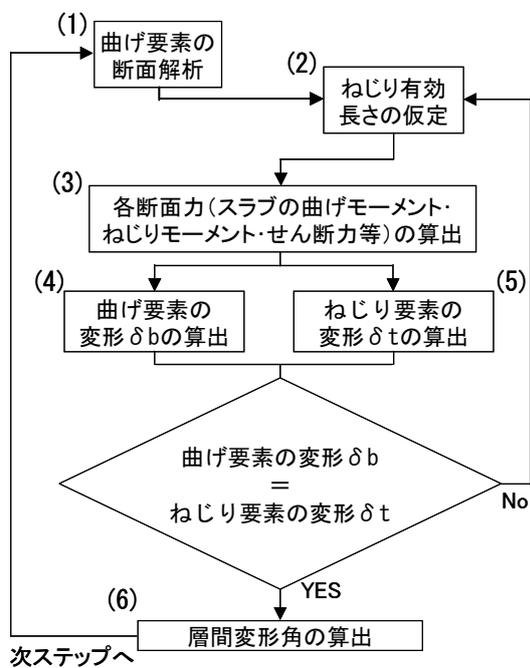
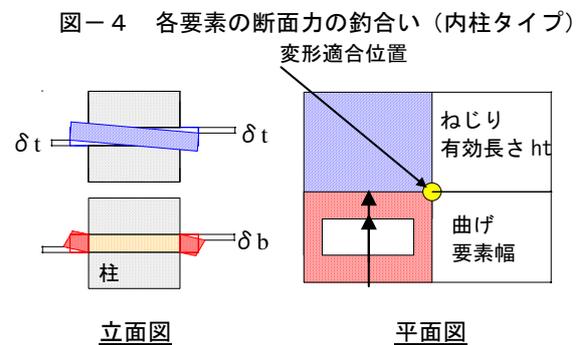
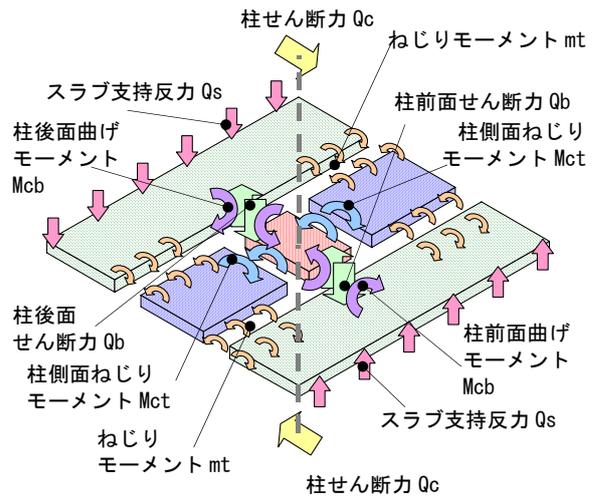
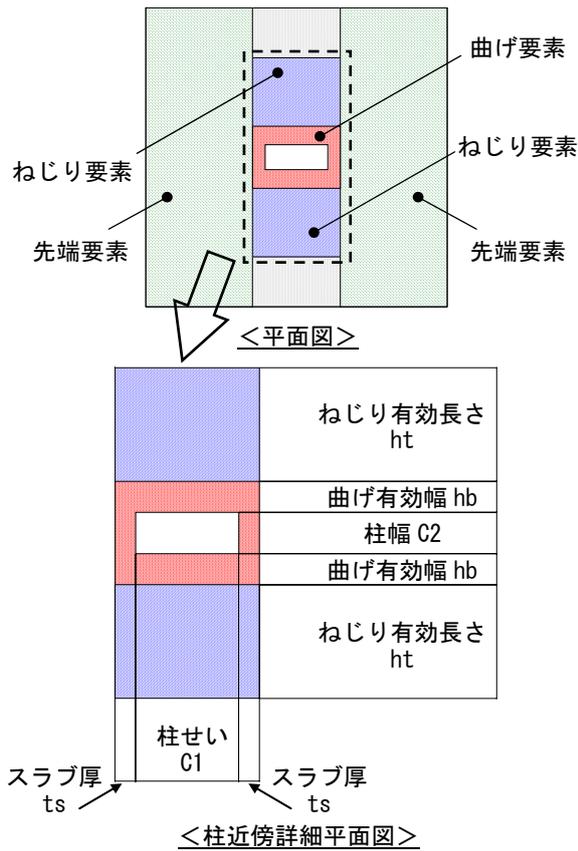


図-1 フラットプレート架構の応力伝達機構

*1 (株) 竹中工務店技術研究所建設技術研究部 主任研究員 工修 (正会員)
 *2 (株) 竹中工務店技術研究所建設技術研究部 研究員 工修 (正会員)
 *3 (株) 竹中工務店東京本店設計部 構造副部長 工修
 *4 (株) 竹中工務店東京本店設計部 課長代理構造担当 工修 (正会員)



要素の有効長さおよび曲げモーメント分布を変化させて収束計算させる。最後に、柱の変形を加えて層間変形角を算出する。

本マクロモデルでは、ねじり要素の有効長さは変形の進展に伴い大きくなり、変形の進展につれてスラブのひび割れや主筋の鉄筋応力分布が水平力に対して直交方向に広がる。これは実験で確認される現象を表すものとなっている。

3. 既往実験の概要

以下にマクロモデルによる解析を行う壁柱・フラットプレート部分架構実験の概要を示す。(詳細は既往文献参照⁵⁾)

表-1に対象とする試験体の一覧、図-6に試験体想定位置図を示す。試験体は3体で、パラメーターは対象とする架構の柱位置と想定する水平力の方向である。図-7に試験体の配筋図を示す。試験体は約1/3の縮尺モデルとし、柱はスラブから上下それぞれ階高の1/2の位置において、スラブは桁行および張間方向ともにスパン中央位置において切り取った形状とした。スラブ厚さ85mm、壁柱に取り付く耐震壁は存在しない。スラブの配筋に関して柱列帯は上端筋 D6 ピッチ 50mm、下端筋 D6 ピッチ 100mm、柱間帯は上端筋 D6 ピッチ 100mm、下端筋 D6 ピッチ 50mm としている。ここで柱列帯は対

象とする柱を中心に加力方向と直交するスパン長の 1/4 の幅とし、柱間帯はそれらを除く幅を示す。

図-8に加力装置図を示す。加力方向と直交するスラブ端部をローラー支持、柱脚部をピン支持とし、柱頭部に油圧ジャッキにより水平力を与えた。試験体 SH はスラブの形状が加力ジャッキの加力方向の軸線に対して非対称なので、加力方向と平行なスラブ面にねじり変形を拘束する治具を設けた。加力は変位制御により、層間変形角 1.0、2.5、5.0、7.5、10.0、20.0、30.0、40.0、50.0 $\times 10^{-3}$ rad において正負繰返し载荷を行った。

表-1 試験体一覧

	対象とする柱	荷重方向
SH	側柱	桁行方向
SY	側柱	張間方向
CH	内柱	桁行方向

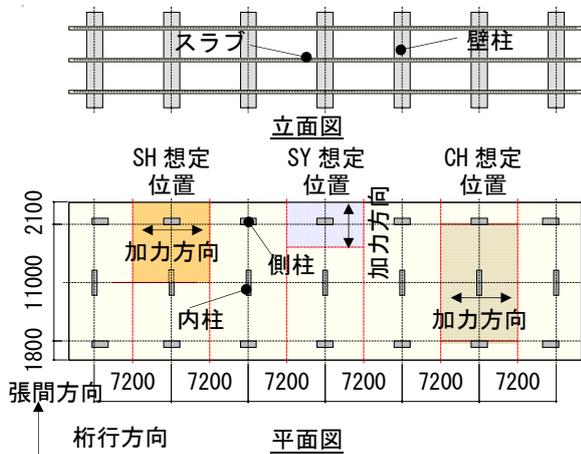
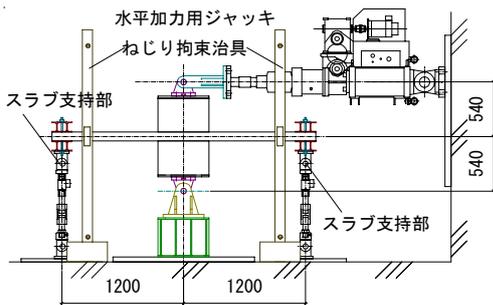
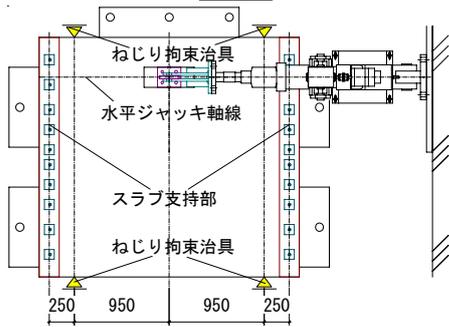


図-6 試験体想定位置図



立面図



平面図

図-8 加力装置図

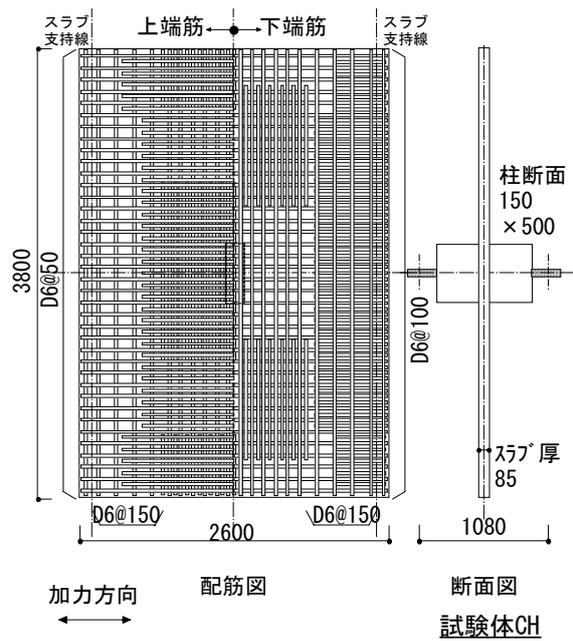
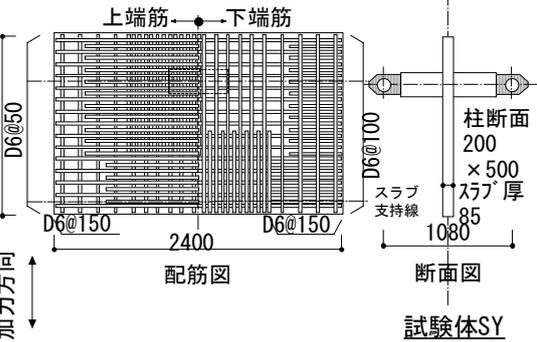
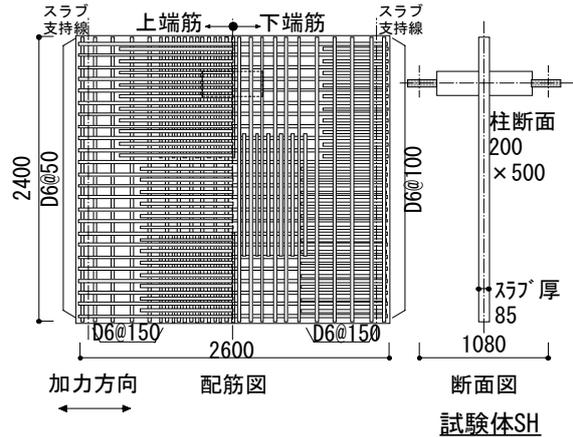


図-7 試験体図

4. マクロモデルによる解析

4.1 解析条件

マクロモデルにより、各試験体の解析を行う。解析対象は、3.で示した試験体3体に加えて、既報¹⁾においてマクロモデルによる解析を行った直交壁を有する試験体4体である。試験体の解析に用いるコンクリートと鉄筋の材料定数および応力とひずみ関係は材料試験結果に基づく。マクロモデルにおける曲げ要素の曲げ有効幅は、スラブおよび直交壁による曲げ要素への影響を考慮

して以下の値とした。

< 曲げ要素ひび割れ前 >

- ・各試験体共通

曲げ有効幅 $hb=1.0\times$ (スラブ厚)

< 曲げ要素ひび割れ後 >

- ・加力方向に対して柱を中心に両側にスラブを有する

試験体 (試験体 CW1, SW1, SH, CH)

曲げ有効幅 $hb=2.5\times$ (スラブ厚)

- ・加力方向に対して柱を中心に片側のみにスラブを有

しかつ直交壁を有する試験体 (試験体 CW2)

曲げ有効幅 $hb=1.5\times$ (スラブ厚)

- ・加力方向に対して柱を中心に片側のみにスラブを有しかつ直交壁の無い試験体 (試験体 SY)

曲げ有効幅 $hb=1.0\times$ (スラブ厚)

4.2 解析結果と実験結果の比較

(1) 水平荷重と層間変形角

図-9に各試験体の水平荷重と層間変形角関係の包絡曲線を示す。図-9中の四角印は実験において柱スラブ接合部を貫通するスラブ主筋が初めて降伏応力に達した時点、図-9中の丸印はマクロモデルによる解析において曲げ要素におけるスラブ主筋が初めて降伏応力に達した時点を示す。表-2にスラブ主筋降伏開始時の水平荷重および層間変形角を示す。水平荷重と層間変形角関係の包絡曲線において解析結果は実験結果を良く表している。柱の長辺が柱せい方向である試験体 CW1, SW1, CW2, SW2, SH に関してはスラブ主筋が初めて降伏応力に達する層間変形角および水平荷重の解析結果は実験結果を良く表している。柱の短辺が柱せい方向である試験体 SY, CH に関しては、マクロモデルによる解析において柱を弾性として計算しているため、柱の変形を小さく評価する傾向にあると言える。

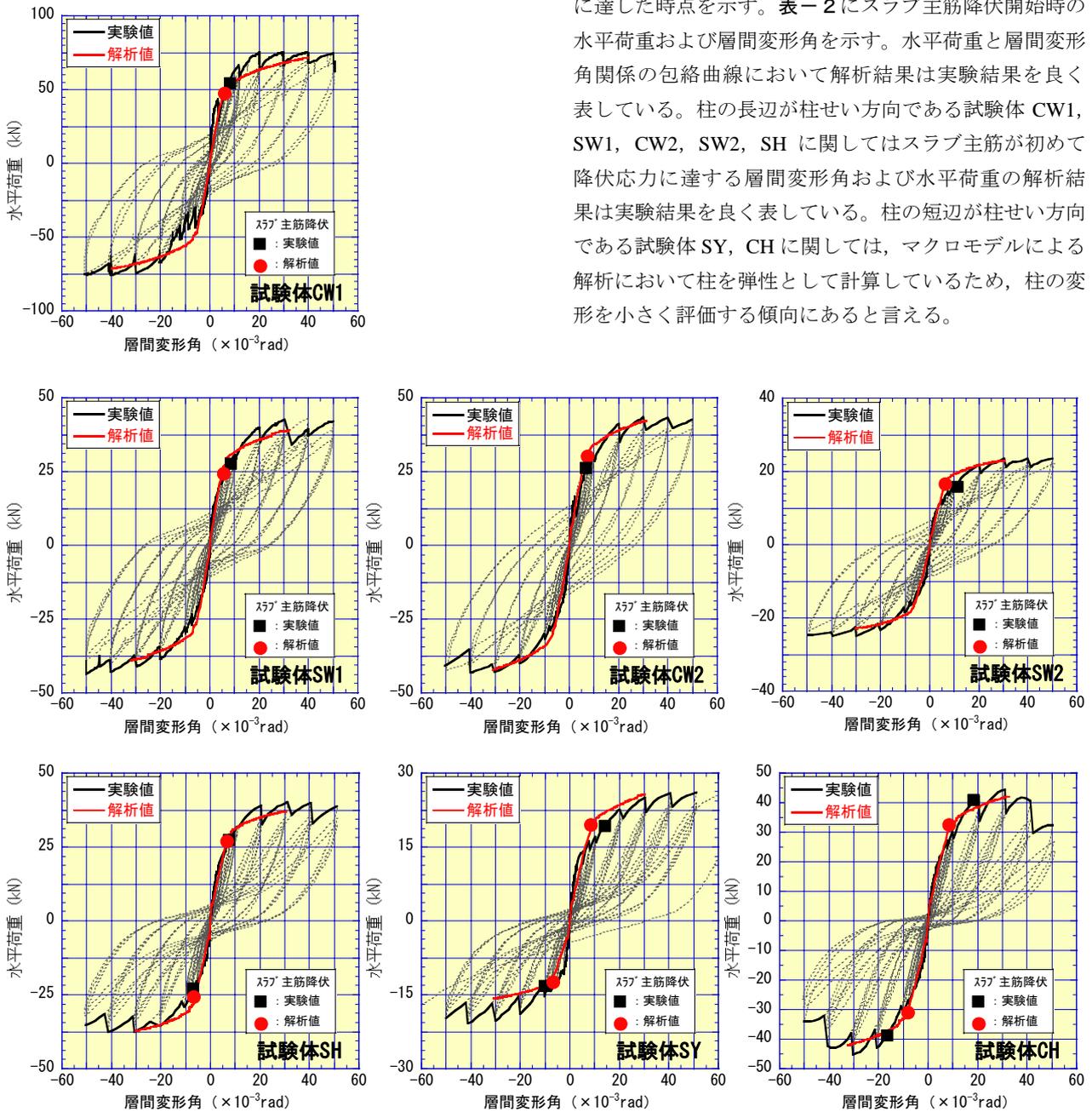


図-9 水平荷重と層間変形角関係における実験値とマクロモデルによる解析結果の比較

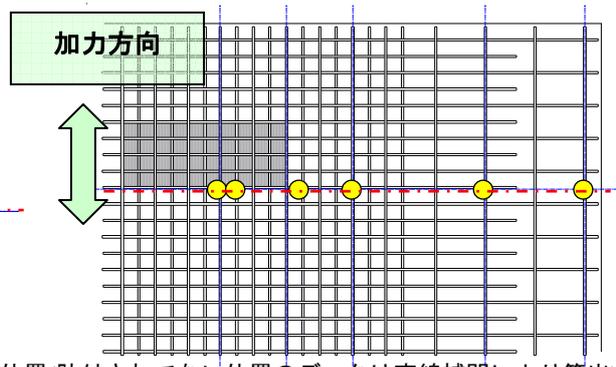
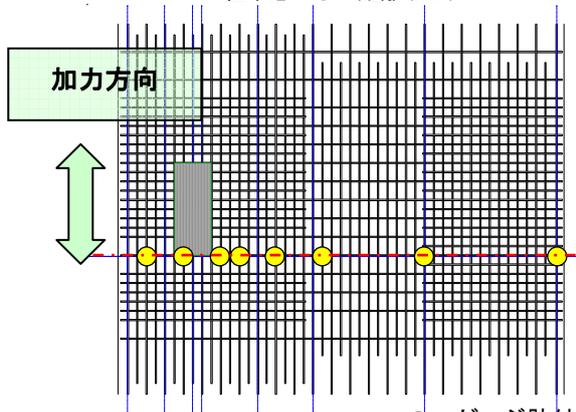
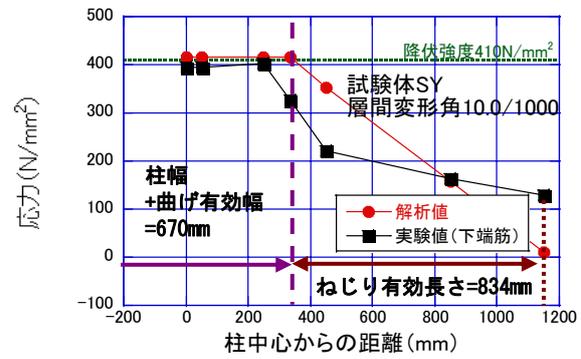
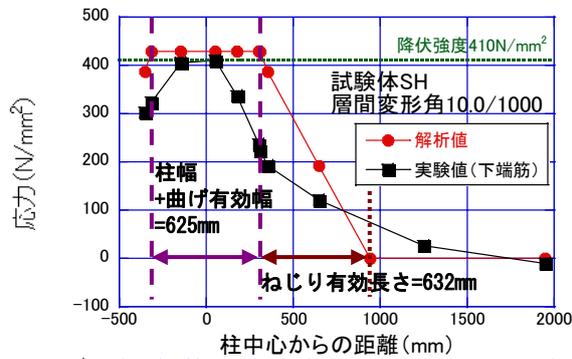
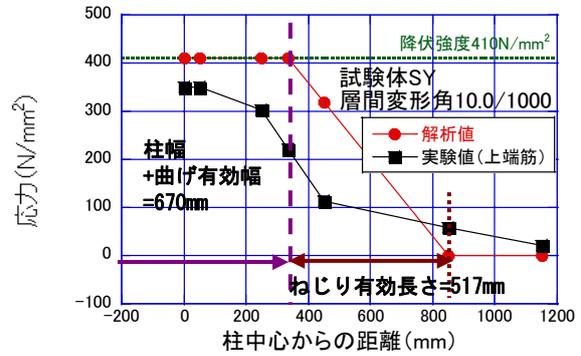
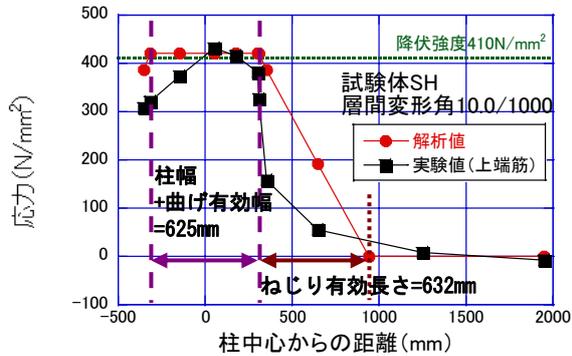
表-2 スラブ主筋降伏時の水平荷重と層間変形角

試験体名	実験値		解析値		
	水平荷重 kN	層間変形角 $\times 10^{-3}$ rad	水平荷重 kN	層間変形角 $\times 10^{-3}$ rad	
CW1	48.0	6.34	46.8 (1.03)	5.34 (1.19)	
SW1	24.9	6.15	26.1 (0.95)	5.31 (1.16)	
CW2	25.6	6.51	26.9 (0.95)	5.60 (1.16)	
SW2	14.6	8.49	15.4 (0.95)	5.60 (1.52)	
SH	上端 引張時	26.9	7.20	28.4 (0.95)	6.92 (1.04)
	下端 引張時	-17.7	-6.54	-25.4 (0.69)	-6.12 (1.07)
SY	上端 引張時	18.6	13.46	18.9 (0.98)	8.71 (1.55)
	下端 引張時	-12.5	-10.49	-11.8 (1.05)	-7.31 (1.44)
CH	上端 引張時	40.7	18.54	32.8 (1.24)	9.02 (2.06)
	下端 引張時	-37.1	-15.26	-30.8 (1.21)	-8.34 (1.83)

()内は実験値/解析値を示す。

(2) スラブ主筋の応力分布

図-10に試験体SH, SYの層間変形角 10.0×10^{-3} rad時における引張側スラブ主筋の水平荷重方向と直交する側の応力分布を示す。図-10において四角印が実験値、丸印がマクロモデルによる解析結果を示す。実験値はスラブ主筋に貼付したひずみゲージの値と鉄筋の引張試験結果より得られた応力ひずみ関係より算出した。各試験体ともねじり有効長さを含めた全体の応力分布に関して、解析結果は実験値を概ねその傾向を表していると言える。柱の長辺が柱せい方向である試験体SHに関しては定量的にも解析結果と実験値は良く一致している。一方、柱の短辺が柱せい方向である試験体SYに関して解析結果は実験値をやや大きく評価する傾向にある。これは水平荷重と層間変形角の関係で示したように解析では柱の変形を小さく評価して、同一層間変形角時におけるスラブ主筋の効果を実験と比較して大きく評価するためと考えられる。



● : ゲージ貼付位置(貼付されていない位置のデータは直線補間により算出)

図-10 スラブ主筋の応力分布における実験値とマクロモデルによる解析結果の比較

図-11に試験体CHの柱の最終ひび割れ状況を示す。試験体SYは、柱脚部にのみ曲げひび割れが発生した。試験体CHは、柱脚部および柱部材中央に曲げひび割れが発生した。その他のCW1, SW1, CW2, SW2, SHに関しては実験終了時まで柱にひび割れは発生しなかった。上記の解析結果と実験結果の比較を踏まえ、今後のモデル化に関しては、柱に加わる断面力（軸力、せん断力、曲げモーメント）に対して柱のひび割れの有無による剛性を考慮して柱の変形を算出することで、更に解析の精度が高められると考えられる。

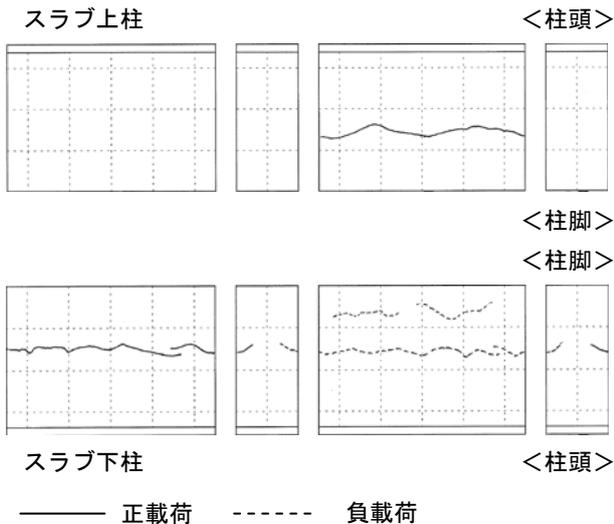


図-11 試験体CH 柱のひび割れ最終状況

5. まとめ

水平荷重に対して直交壁の無い壁柱・フラットプレート部分架構試験体および既報¹⁾で示した直交壁を有する壁柱・フラットプレート部分架構試験体の水平加力実験に関して、提案したマクロモデルによる解析を行い、水平荷重と層間変形角の関係およびスラブ主筋の応力分布に関して実験結果と解析結果の比較を示した。水平荷

重と層間変形角の関係について解析結果は実験値を良く表している。スラブ主筋の応力分布に関しては、壁柱の短辺が柱せいとなる試験体について同一層間変形角時における解析結果は実験値をやや大きく評価する結果となった。これは解析では柱の変形を小さく評価して、同一層間変形角時におけるスラブ主筋の効果を実験と比較して大きく評価するためと考えられる。

今後、柱のひび割れによる剛性を適切に評価することをモデルへ反映していく。

参考文献

- 1) 太田義弘, 卜部藍, 太田博章, 川合拓: 壁柱・フラットプレート架構の水平荷重に対する力学的特性に関する研究, コンクリート工学年次大会論文集, Vol.30, No.3, pp.499-504, 2008.6
- 2) Y.H. Luo, A.J. Durrani: Equivalent Beam Model for Flat-Slab Buildings Part 1:Interior Connections, ACI Structural Journal, Vol.92, No.1, pp115-124,1995
- 3) Y.H. Luo, A.J. Durrani: Equivalent Beam Model for Flat-Slab Buildings Part 1:Exterior Connections, ACI Structural Journal, Vol.92, No.2, pp250-257,1995
- 4) Hawkins, N.M, Wong, F.C., Yang, C.H.: Slab-Edge Column Connections Transferring High Intensity Reversing Moments Normal to the Edge of the Slab, SM78-1, Department of Civil Engineering, University Washington, 1978
- 5) 太田義弘, 岡本晴彦, 山本正幸, 太田博章: 水平荷重を受けるフラットプレート架構の力学的挙動に関する研究, コンクリート工学年次大会論文集, Vol.24, No.2, pp.565-570, 2002.6