

論文 ハーフプレキャストスラブを有する壁式 RC 造内部交差部の有限要素解析

寺井 雅和*1・北野 敦則*2・後藤 康明*3・城 攻*4

要旨：筆者らは、鉛直力と同時に面外水平力を受ける計 8 体の RC 造壁スラブ交差部の実験を行い、その破壊性状の把握と耐震性能の向上について検討してきた。本報はこのうち内部交差部 3 体の試験体を対象として、有限要素法を用いてその諸性状について検討した。PCa スラブかかりし部分のモデル化により、実験で得た荷重変形特性はおおむね再現できるようになり、壁の軸応力度の増大に伴うせん断耐力の増加や、スラブ成中央近くに配筋されたスラブ主筋の性状が解析結果でも示された。

キーワード：有限要素解析、壁床交差部、ハーフ PCa スラブ、せん断耐力、付着

1. はじめに

我が国の設計基準では、大きな地震力に抵抗させるために RC 壁式構造では壁率等の制限を用いて耐震壁の面内方向の耐力に期待して設計している。一方、諸外国では、RC 壁式構造を桁行方向に耐震壁を少なくした集合住宅などに適用する場合があります、この方向の水平抵抗は壁・スラブ交差部の面外耐力に大きく依存することになる。この際に施工性・経済性の利点から、床にプレキャストを用いた壁式構造を用いることがある。しかし、比較的大きな地震を想定しない地域では、地震荷重を考慮せず設計されており、建築物の水平加力時の破壊性状はあまり明らかにされていない。

筆者らはこれらの事情を背景にし、ハーフ PCa スラブと現場打ち RC 壁とから構成される壁式構造を対象として、鉛直と同時に面外水平力を受ける壁スラブ交差部の破壊性状の把握と耐震性能の向上について主として実験的に検討してきた [1, 2]。

本報告では、これらの壁スラブ交差部試験体のうち軸応力度、鉄筋量および配筋寸法のことなる 3 体を対象として選び、二次元非線形有限要素解析を行い、RC 造構造物の数値モデル化における問題点について検討する。

表 1 試験体諸元

試験体名		WSJ-1	WSJ-2	WSJ-4
RC 壁	主筋	4-D16	2×(4-D16)	
	軸力	0.1 $\sigma_B \cdot b \cdot D$	0.1 $\sigma_B \cdot b \cdot D$	0.17 $\sigma_B \cdot b \cdot D$
	断面	200×700(=b・D)(mm)		
ハーフ	上端筋		4-D16	4-D16
	下端筋	4-D16	4-D16	4-D16
PCaスラブ	スラブ荷重	16.2(kN)		
	PCaスラブ内補強筋	6× ϕ 6		
	ホイト	5×(外径76mm塩ビ管)		
	断面	200×700(mm)		
破壊モード		スラブ端曲げ破壊	交差部せん断破壊	交差部せん断破壊

σ_B : 交差部のジョイント一軸圧縮強度(MPa)

表 2 材料特性

		コンクリート				補強筋			
		σ_B	σ_t	ϵ_{max}	E_c	σ_y	ϵ_y	E_s	
WSJ-1	Wall&Slab	25.5	2.83	2400	20.1	D16 ϕ 6	358	2340	153
	Joint	26.3	2.21	2760	20.1				
	PCa	34.8	3.25	2970	22.2				
WSJ-2	Wall&Slab	24.7	2.74	2810	18.8	D16 ϕ 6	385	1830	210
	Joint	22.8	2.23	2700	18.5				
	PCa	37.2	2.54	3180	22.9				
WSJ-4	Wall&Slab	18.2	1.87	2620	17.3	D16 ϕ 6	359	2270	159
	Joint	17.7	1.81	2650	17.1				
	PCa	30.6	2.67	2810	22.8				

$\sigma_B, \sigma_t, \sigma_y$: MPa $\epsilon_{max}, \epsilon_y$: μ E_c, E_s : GPa

* 1 北海道大学大学院 工学部建築工学科、工修(正会員)

* 2 北海道大学助手 工学部建築工学科、工修(正会員)

* 3 北海道大学助教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

* 4 北海道大学教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

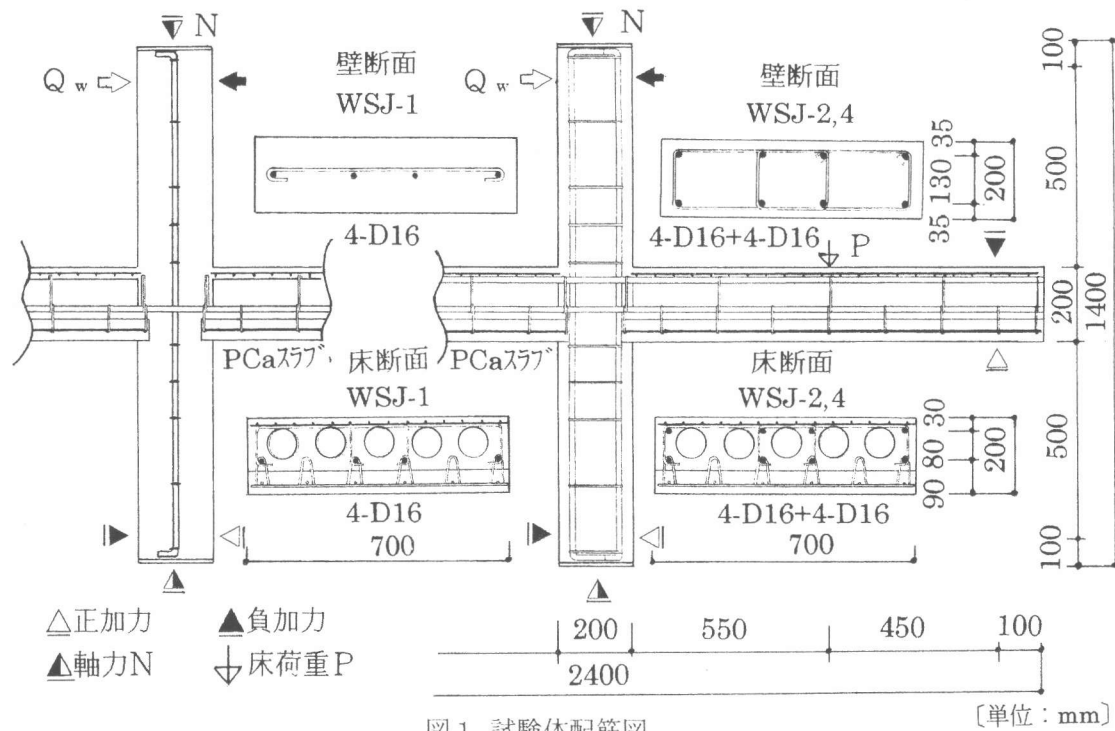


図1 試験体配筋図

[単位：mm]

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

解析は、壁・スラブともに曲げ補強筋をシングル配筋としスラブ付け根の曲げ破壊に至った WSJ-1、壁・スラブともにダブル配筋とし壁スラブ交差部のせん断破壊に至った WSJ-2 と 4 の 3 体について行った。WSJ-4 は-2 に対して壁軸応力度を約 2 倍高くしたものである。試験体形状は 3 体とも同一で、階高 3 m、スパン 6 m 程度の RC 造架構の原寸大内部交差部より壁・スラブともに 1/3 の部分を切り出したものである。壁・スラブ断面はともに 200×700mm、左右スラブの支持点間距離 2200mm、上下壁の支持点間距離 1200mm である。

試験体諸元を表 1 に、材料特性を表 2 に、試験体配筋図を図 1 にそれぞれ示す。実験は'94 年度 (WSJ-1, 3)、'95 年度 (WSJ-4) の 2 年にわたって製作・実験されたため、材料特性が試験体によって異なっている。特に WSJ-4 のコンクリート強度は他の 2 体より 2~3 割低い。加力は実構造物の固定荷重及び積載荷重によるスラブ端モーメントを再現させるのに必要な集中力をスラブに加力した後、WSJ-1, 3 には $\sigma_B/10$ 、WSJ-4 には $\sigma_B/6$ に相当する定軸力を壁頭にそれぞれ加えた。その後、上壁頂部に取り付けられたアクチュエータにより静的漸増正負水平繰り返し载荷を行った。

2.2 解析方法

解析には、千葉大の張らによって開発された二次元非線形有限要素プログラム[3]を使用した。要素分割を図 2 に示す。幅方向に関しては試験体幅 700mm、ただしスラブのボイド部分はボイドの断面積を除いたコンクリートの有効負担面積として幅 380mm×厚さ 80mm を算入し、図 3 のように I 型断面に置換した。本解析においてスラブ付け根の危険断面から PCa スラブかかりしろ部分までは、図 5(図 2 の○部分を拡大)に示す 3 つのモデルで評価している。Model-A は交差部内のコンクリートと PCa 側のコンクリートに異なる接点番号を与え、同一座標の接点に付着要素を配置する実験時亀裂状況に近いモデルである。このかかりしろ部分は PCa と後打ちコンクリートの付着および摩擦で抵抗するが、付着要素を線形の構成則として利用し、その材料特性は水平方向のバネ

には、鉄筋とコンクリートが抵抗するより小さい値として最大付着力 1.6MPa、滑り量 0.002mm を算入、鉛直方向には零に近い値を算入しほとんど抵抗しないようにモデル化した。Model-B は Model-A からクラックリンク要素を抜いたモデル。Model-C は、PCa かかりしる部分を無視し、壁表面を延長した位置の離散型要素で表現したモデルである。

2. 3 解析モデル

以下に平面応力状態の解析モデルの概要を示す。コンクリート：コンクリートは要素内剛性の評価を内部積分点で行う 8 節点平面応力要素で表現する。2 軸応力下の構成則には、Darwin らの等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルを用い、破壊条件は Kupfer らの研究に基づく。圧縮応力-ひずみ関係の上昇域は Saenz の式を用いた。試験体製作において PCa スラブ、交差部周辺、後打ち壁・スラブのコンクリートを打ち分けたため、3 種類の特性があることを解析においても表現した。PCa スラブの引張強度には、曲げ引張強度 ($0.56\sqrt{\sigma_B}$ 、 σ_B ：コンクリート一軸圧縮強度、MPa) の値を使用し、その他の部分は材料試験から割裂強度を使用した。鉄筋：すべての補強筋は、2 接点線材要素で表現する。応力-ひずみ関係として、バイリニア型のモデルを使用する。付着：壁およびスラブ主筋とコンクリートとの付着はバイリニア型のボンドリンク要素で表現し、ボンドリンクの材料特性には既往の RC 造柱梁接合部の研究[4]を参考に、交差部コア部、交差部かぶり部、壁・スラブ部の 3 種類を使い分けた(図 4)。PCa スラブ内の 6φ鉄筋は完全付着とした。ひびわれ：コンクリート要素のひびわれは、分布ひびわれモデルで表現する。曲げひびわれの開口が顕著なスラブ付け根の危険断面には離散型ひびわれ要素を使用し

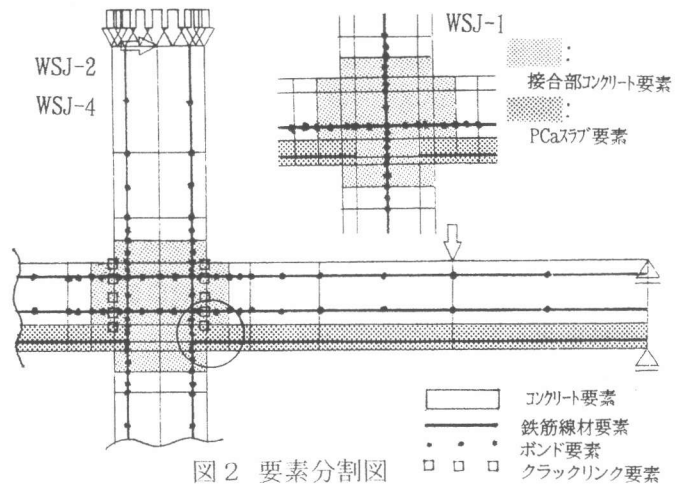


図 2 要素分割図

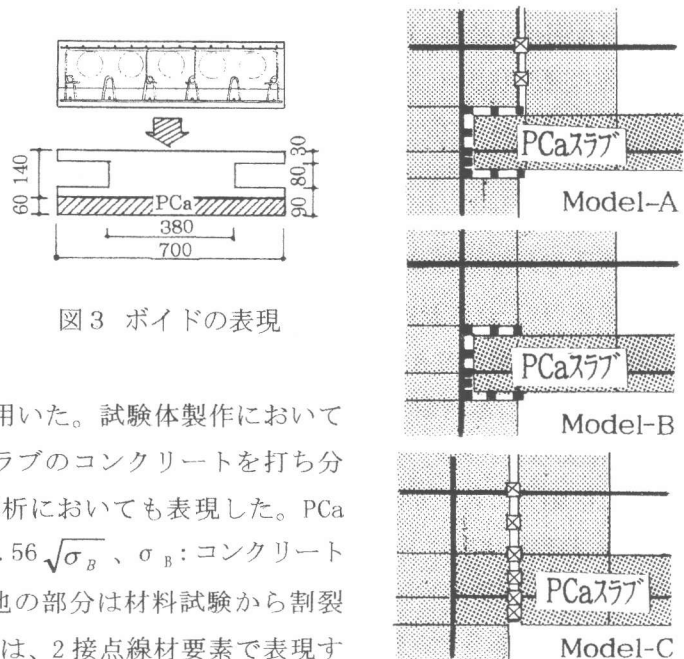


図 3 ボイドの表現

図 5 PCa かかり部のモデル化

PCa スラブ、交差部周辺、後打ち壁・スラブのコンクリートを打ち分けたため、3 種類の特性があることを解析においても表現した。PCa スラブの引張強度には、曲げ引張強度 ($0.56\sqrt{\sigma_B}$ 、 σ_B ：コンクリート一軸圧縮強度、MPa) の値を使用し、その他の部分は材料試験から割裂強度を使用した。鉄筋：すべての補強筋は、2 接点線材要素で表現する。応力-ひずみ関係として、バイリニア型のモデルを使用する。付着：壁およびスラブ主筋とコンクリートとの付着はバイリニア型のボンドリンク要素で表現し、ボンドリンクの材料特性には既往の RC 造柱梁接合部の研究[4]を参考に、交差部コア部、交差部かぶり部、壁・スラブ部の 3 種類を使い分けた(図 4)。PCa スラブ内の 6φ鉄筋は完全付着とした。ひびわれ：コンクリート要素のひびわれは、分布ひびわれモデルで表現する。曲げひびわれの開口が顕著なスラブ付け根の危険断面には離散型ひびわれ要素を使用し

ボンドリンク要素で表現し、ボンドリンクの材料特性には既往の RC 造柱梁接合部の研究[4]を参考に、交差部コア部、交差部かぶり部、壁・スラブ部の 3 種類を使い分けた(図 4)。PCa スラブ内の 6φ鉄筋は完全付着とした。ひびわれ：コンクリート要素のひびわれは、分布ひびわれモデルで表現する。曲げひびわれの開口が顕著なスラブ付け根の危険断面には離散型ひびわれ要素を使用し

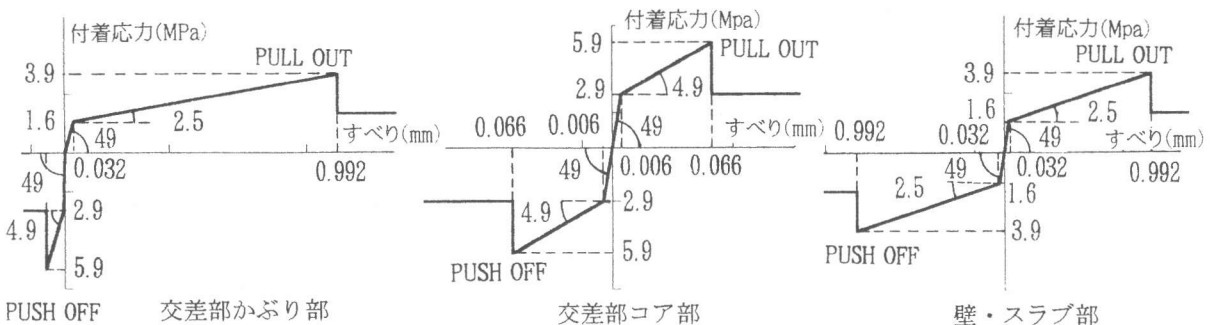


図 4 ボンドリンク材料定数

た(WSJ-2,4の場合)。ひびわれが閉じているときには、ばね定数には剛体を仮定した値が入っており、ひびわれ両面の節点の主応力が引張強度を越えた場合、ひびわれが発生したと判定しばね剛性を零に変化させている。

3. 解析結果

図6に各解析の層せん断力-層間変位関係および諸事象発生状況を示す。実験値は正加力時の荷重変形関係を示している。また耐力は壁頂部の水平力を表している。破壊モードは解析においても実験結果と同じく、シングル配筋のWSJ-1はスラブ付け根のコンクリート要素で早期に破壊する曲げ破壊先行型、ダブル配筋のWSJ-2,4はともに層間変形角1/60rad程度でスラブ付け根上端かぶり部、および交差部内のコンクリート要素で圧壊が生じ交差部せん断破壊をした。

3.1 荷重-変形関係

ダブル配筋をしたWSJ-2,4では層間変形角が1/300rad程度までの初期剛性、およびパネルせん断初亀裂の発生状況・主筋の降伏時期は、実験との対応が良好である。WSJ-2において、PCaかかりしを離散型にモデル化したModel-Cでは引張側となるPCaかかりしろ部分が初期段階に開口して実験値よりも激しい剛性劣化を生じていたがModel-A,Bでは概ね実験値に対応している。同様に最大耐力時変形形状も対応が良くなっている(図6-1)。Model-AとModel-Bで比較をすると層間変形角1/80rad以降緩やかに剛性が低下し、最大耐力はおよそ6%低下した。以上のことから、この試験体(WSJ-2)においてはPCaスラブの引張側かかりしろ部分のモデル化が、初期剛性と最大耐力時変形に影響を与えていることがわかる。

Model-Aによる解析耐力値はWSJ-2で7.2%、WSJ-4で18.7%ほど実験値より低くなった。実験の検証[2]によると、軸応力度が上がると耐力も上昇する結果が得られている。しかし解析における耐力値は壁軸力の高いWSJ-4の方がWSJ-2より小さくなっているのは、前者の交差部コンクリート強度が2割程小さいことも理由の一つである。両者のコンクリート強度の違いを相互に補正するために、多数の実験値の統計処理結果として従来より使われている補正法として耐力値を $\sqrt{\sigma_B}$ で割って無次元化すると、軸応力度の高いWSJ-4が18.8、WSJ-2が17.6となり、軸力の耐力上昇効果は解析結果でもあらわれていることになる。

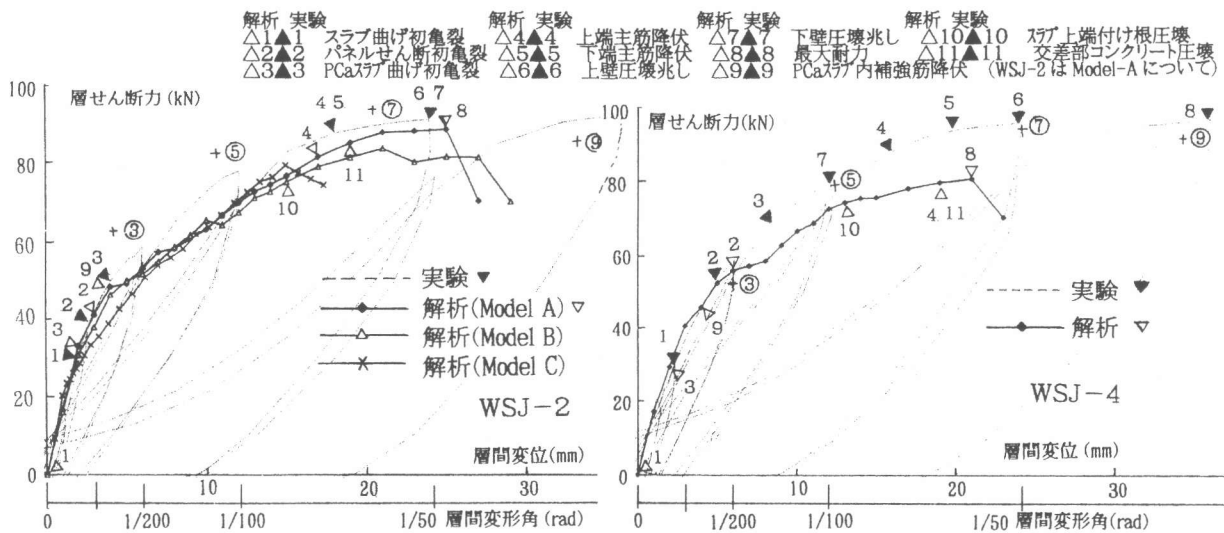


図6-1 層せん断力-層間変位関係 (WSJ-2,4)

シングル配筋の WSJ-1 を Model-A で解析したところ、水平変位を与える前の軸力 N およびスラブ荷重 P を加えたときに、スラブの上端主筋がないためスラブ付け根の危険断面にあるクラックリンク要素が大きく開口し過大な変形を生じたので、WSJ-1 ではこのクラックリンク要素を除いた Model-B を用いた解析結果で検討した。

実験値の正側荷重-変形曲線の包絡線と解析結果を比較すれば、せん断変形角は 1/400rad から 1/200rad の間は実験に対して解析の剛性が高くなっている。この理由として曲げ破壊をしたスラブ付け根の危険断面を離散型要素を用いず Model-B で解析したためと考えられる。

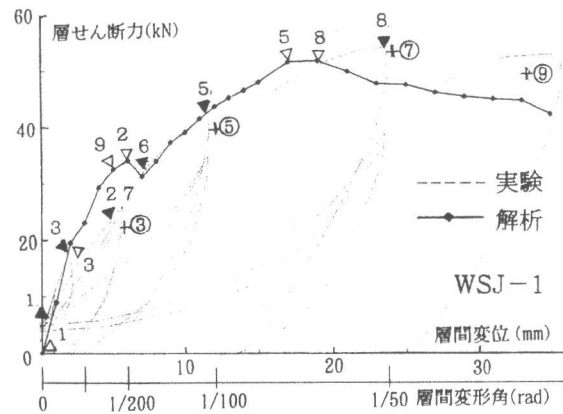
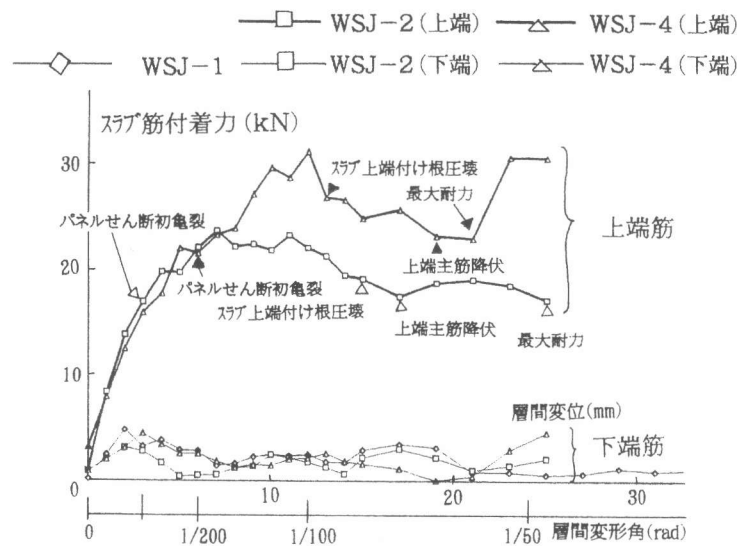


図 6-2 層せん断力-層間変位関係 (WSJ-1)

3. 2 交差部内壁・スラブ主筋の付着力

交差部内主筋に配置したボンドリンクの付着力を合計したものを壁・スラブに分けて図 7 に示す。上端スラブ主筋はせん断変形角 1/200rad まで同じような傾向で付着力が増大し、その後 WSJ-2 は頭打ちとなる。一方軸応力度の高い WSJ-4 はスラブ付け根のかぶり部で圧壊を生じるまで増大した。これに対して、WSJ-1 のスラブ主筋および WSJ-2, 4 の下端スラブ主筋は PCa スラブの存在によりスラブ成中央付近に配筋されているため、変形の増大とともにスラブの中立軸が変形し、交差部端部では両引き状態になってくる。このため交差部内では付着力が小さくなる性状が解析結果でも示されている。



上壁と交差部との付け根位置には曲げ亀裂が発生するため、左側に位置する(図 7)主筋の付着力は変形とともに増加する。これに対して右の主筋はスラブ荷重の影響で下壁の曲げ亀裂の発生が遅れ、付着力は 1/200rad 頃から増加の傾向を示す。壁中央に配筋された WSJ-1 でも、上壁の曲げ亀裂が壁中央付近に達する 1/200rad 頃までは交差部内に付着力は生じないことがわかる。

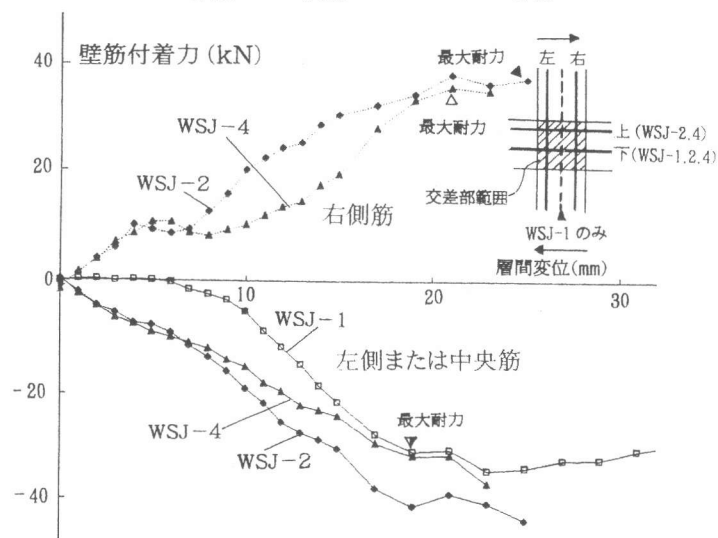


図 7 交差部の壁・スラブ主筋総付着力 (上)スラブ (下)壁

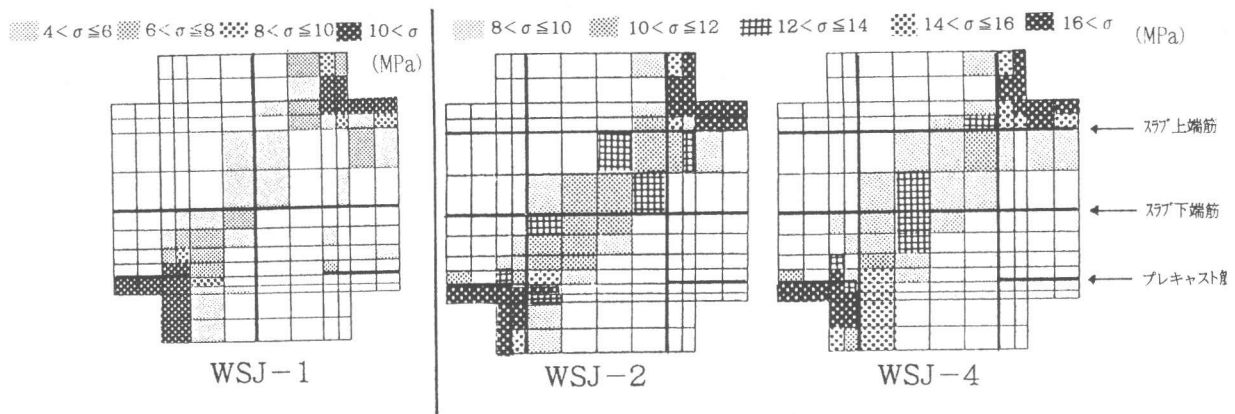


図8 交差部内の主圧縮応力分布

3. 3 主圧縮応力

最大耐力時の交差部コンクリート主圧縮応力分布を図8に示す。スラブ端付け根の曲げ破壊をしたシングル配筋のWSJ-1は交差部内の圧縮ストラットの応力レベルが低く、交差部破壊に至っていないことがわかる。交差部せん断破壊をしたダブル配筋の2体は、壁軸応力度がWSJ-2より高いWSJ-4で圧縮ストラット幅がやや広くなり、これに伴って各要素の応力レベルがやや低くなっている。

4. まとめ

RC造壁床交差部の有限要素解析を行い実験との対比を試みた結果、以下の事が判った。

1. ダブル配筋のWSJ-2において引張側となるPCaスラブかかりしろ部分の離散亀裂、及び界面すべりのモデル化は荷重変形関係に影響を与え、検討した3つのモデルのうち実験時の亀裂性状を考慮したModel-Aが実験結果をもっともよく表現している。
2. シングル配筋のWSJ-1のスラブ主筋およびPCaスラブのためにスラブ成中央近くに配筋されたダブル配筋のWSJ-2,4のスラブ下端筋は、交差部両側で両引き状態となり交差部内の付着力はきわめて小さい性状が解析でも示された。
3. 壁の軸応力度の増大に伴って交差部せん断耐力が上昇する実験結果は、軸応力度を変化させたWSJ-2と4の解析結果でもある程度その傾向が示された。

今後は付着と交差部せん断破壊の相互作用に着目するとともに、コンクリートの圧縮軟化によって荷重が劣化する過程を含む、最大耐力後の破壊性状にも対応できるモデル化が必要である。

【参考文献】

- [1]Algirdas A. KUDZYS、城 攻ほか：壁式RC造における十字形壁-床交差部の破壊性状に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 2、pp. 823-828、1994. 6
- [2]Algirdas A. KUDZYS、Osamu JOH and et al: Behavior of R/C Interior and Exterior Wall-slab Connections under Lateral Out-plane loading、Proceedings of JCI、Vol. 17、No. 2、pp. 1131-1136、1995. 6
- [3]張愛暉：鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析、千葉大学学位論文、1991
- [4]北山和宏ほか：有限要素法によるRC造内部柱・はり接合部せん断抵抗機構の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp. 334-335、昭和62. 10