

論文 スタッド筋を有する柱 - フラットプレート接合部のせん断挙動に関する実験研究

岡崎 和広^{*1}・榎谷 榮次^{*2}・伊藤 嘉則^{*3}・神吉 裕輔^{*4}

要旨：フラットプレート構造の柱とスラブの接合部は、通常のラーメン構造より小さいため、地震力を受けた場合、接合部のせん断抵抗に対する安全性の検証が必要となる。本論は、スタッド筋によりせん断補強された柱 - フラットスラブ接合部のせん断挙動を調べるために、一方向スラブによる十字形モデルの試験体を作製し、水平加力実験を行った。その結果、せん断補強を施さない比較用試験体に対し、スタッドレール筋による補強効果を有することが明らかとなった。

キーワード：スタッド筋，柱 - フラットプレート接合部，せん断補強効果，フラットプレート

1. はじめに

地震力を受けたフラットスラブ構造の柱 - スラブ接合部は、通常のラーメン構造より小さいため、大きなせん断力が作用することとなる¹⁾。そのため、接合部においては、せん断抵抗に対する安全性の確認が非常に重要なものとなる。我が国では、柱頭部にハンチや支板などを設けることで接合部の耐力を確保し、パンチング破壊などを防止する対策が施されている。しかしこれらの存在は、空間を構成する上で支障となるうえ、経済的にも有効な設計法とは言い難い。

本研究は、柱 - スラブ接合部におけるせん断挙動として、柱頭部にハンチや支板を設けないフラット

プレート構造を対象にスタッド筋によりせん断補強された十字形接合部について検証したものである。なおスタッド筋とは、異形鉄筋の両端部を熱間プレスにより特殊な皿(鉄筋径の3倍)を有した鉄筋である。このスタッド筋の一端を薄板鋼板(厚さ3mm)に溶接接合された補強筋(以下、スタッドレール補強筋)の配置方法の違いに着目し実験を行った。なお実験は、スラブを柱位置で直交する2方向の梁と見なし、そのうちの1方向スラブに着目した。その十字形接合部による試験体を作製し、水平加力実験を行うことで、接合部のせん断挙動を調べ、スタッド筋によるせん断補強効果について検証した。

表 - 1 試験体一覧

試験体記号	試験体形状	断面						スタッド筋		スラブ筋の機械式定着
		スラブ			柱			径・間隔	配置方法	
		断面	シアスパン比	上下端筋	断面	シアスパン比	主筋			
+ - N - N	十字形	500 × 200	3	5-D22 (SD490)	300 × 300	2	8-D22 (SD490)	-	-	無
+ - N - SR1				12 (SS490) @100			スラブ内			
+ - N - SR3							スラブ内及び接合部貫通			
+ - N - SR2				D10 (SD295A) @100			スラブ内及び柱内			
+ - MA - SR2							スラブ内及び柱内	有		

*1 関東学院大学大学院 工学研究科博士前期課程 建築学専攻 (正会員)

*2 関東学院大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 建材試験センター 中央試験所構造グループ 技術職 工修 (正会員)

*4 ジャパンライフ株式会社

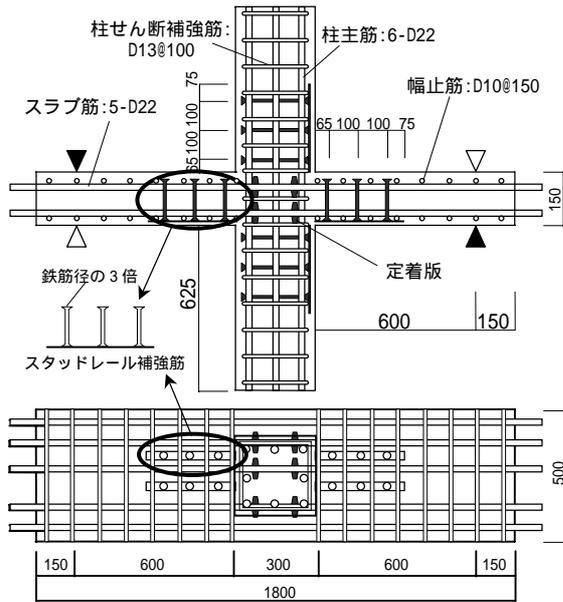


図 - 1 試験体 (試験体記号: + - MA - SR2)

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表 - 1 に、また試験体の概要を図 - 1 に示す。

本研究に用いた試験体の形状は、柱 (幅 300mm × せい 300mm) 及びスラブ (厚さ 200mm × 幅 500mm) からなるフラットプレート接合部を想定した十字形モデルである。なお本研究におけるスラブは、1 方向スラブを対象とした。またコンクリート設計基準強度は、一律 $F_c 24 \text{ N/mm}^2$ とし、更に、スラブ筋及び柱主筋には、接合部のせん断破壊を先行させるため D22 を、柱のせん断補強筋には、D13 (SD295A) を使用した。これらを共通条件に、2 列配置したスタッドレール補強筋の配置方法の違いに着目し、試験体は以下のように定めた。なお本論では、100mm 間隔のスタッド筋 3 本を 1 組にしたスタッドレール補強筋を使用した。

試験体 + - N - SR1 は、スタッドレール補強筋によるせん断補強効果を見るための基準試験体であり、柱際のスラブ内のみ補強した試験体である。特にこの試験体は、パンチング破壊に対する検証を主に行うための試験体である。但し、スタッド筋は、12 (SS490) を、また、スラブ筋は、D22 (SD490) を使用した。

試験体 + - N - SR3 は、パンチング破壊だけでな

表 - 2 鉄筋の機械的性質

鉄筋種類	試験体	降伏点強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 kN/mm ²	伸び率 (%)
スラブ筋 D22 SD490	+ - N - N	460	2447	654	184	18
	+ - N - SR1 + - N - SR3	304	1520	508	200	20
スラブ筋 D22 SD390	+ - N - SR2	455	2365	641	200	19
	D13 SD295A	351	1793	161	190	28

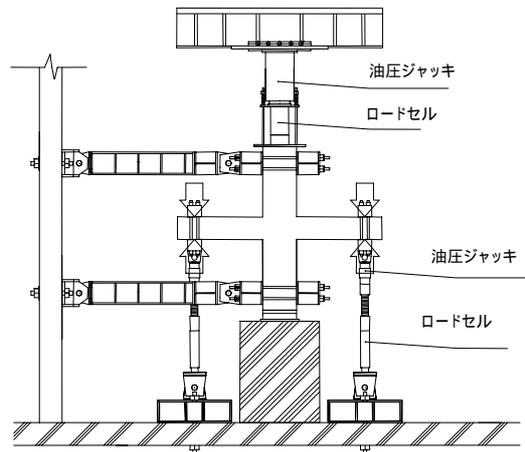


図 - 2 実験方法

く、接合部の挙動も改善するため、スタッドレール補強筋を柱際のスラブから接合部内を貫通して配筋したものである。なお、スタッド筋及びスラブ筋は、上記同様である。

試験体 + - N - SR2 は、スラブ筋の引張力に釣り合う斜め圧縮力に対するスタッド筋のせん断補強効果を把握するため、柱際のスラブと接合部近傍の柱内にも補強した試験体である。但しスタッド筋は、D10 (SD295A) を、スラブ筋には、D22 (SD390) を使用した。

試験体 + - MA - SR2 は、上記の試験体に、通し鉄筋として配筋されたスラブ筋に、接合部内で円形状の定着版を設け、スラブ筋の付着力の向上を図った試験体である。なお、スタッド筋及びスラブ筋は、試験体 + - N - SR2 と同様である。

以上の条件のもと、試験体数は、無補強とした試験体 1 体を含めた総計 6 体として計画した。

なお、鉄筋の機械的性質を表 - 2 に示す。

2.2 加力方法

実験は図 - 2 に示すような加力装置を用いて、柱上下端をピン支持により水平拘束し、スラブ外端部を容量 300kN 油圧ジャッキにより変位制御のもと

表 - 3 実験結果一覧

試験体記号	コンクリート圧縮強度 [N/mm ²]	接合部せん断ひび割れ発生時		降伏時		スタッド筋降伏時		最大		限界時
		せん断力 Qcr [kN]	変形角 Rcr [$\times 10^{-3}$ rad]	せん断力 Qmy [kN]	変形角 Rmy [$\times 10^{-3}$ rad]	せん断力 Qys [kN]	変形角 Rys [$\times 10^{-3}$ rad]	せん断力 Qut [kN]	変形角 Rut [$\times 10^{-3}$ rad]	変形角 Ru [$\times 10^{-3}$ rad]
+ - N - N	32.3	101.9	12.5	-	-	-	-	110.7	15.1	16.8
+ - N - SR 1	32.3	86.8	8.6	128.9	19.5	106.7	39.7	138.7	26.7	37.2
+ - N - SR 3	27.9	109.8	14.7	108.0	15.8	113.6	31.4	122.5	21.3	36.7
+ - N - SR 2	26.2	79.0	6.8	119.6	17.0	101.5	39.9	132.8	20.7	38.8
+ - MA - SR 2	28.7	79.0	8.0	124.3	17.6	132.4	28.4	135.8	30.1	64.7

(注)限界時:最大荷重から80%荷重低下した点とした。

逆対称モーメントによる正負交番繰返し荷荷を行った。また柱の軸力は、容量 1000kN 油圧ジャッキで、軸力比 0.15 の一定軸力を与えた。変位は、スラブ端部に電気式変位計を取付け、相対鉛直変位を層間変位とし、これをスラブ支持間距離で除した値を変形角 (R) とした。なお加力サイクルは、変形角 $R=1/250, 1/125, 1/62.5, 1/31$ rad(スラブの変形角で $1/200, 1/100, 1/50, 1/25$ rad)を各変形角ともに 1 回ずつ繰返した後、破壊に至るまで加力を行った。

また鉄筋のひずみは、スラブ筋及びスタッド筋のウェブ部に貼付したひずみゲージにより測定した。

3. 実験結果

実験結果一覧を表 - 3 に示す。

3.1 破壊性状

いずれの試験体も初期ひび割れは、柱際のスラブ側面に曲げひび割れが発生し、その後、両端スラブ及び接合部内にせん断ひび割れが発生した。無補強とした試験体及び + - N - SR 1 は、接合部近傍のスラブ側面に比較的大きなせん断ひび割れが最大耐力の直前に生じた。特に無補強の試験体は、この斜めひび割れにより脆性的な破壊を示した。全体を通して見ると、補強した試験体については、ひび割れ性状に大きな違いがなく、最終的に接合部のせん断破壊であった。但し、最大耐力に至るまでは、曲げ破壊による様相を示していた。また、柱 スラブ接合部の両側スラブ部分に多数のせん断ひび割れが発生したが、実験終了後この部分をはつって観察し

た結果、これらのひび割れは、柱まで到達していないことが確認された。

以上より、脆性的な接合部のせん断破壊を示した無補強の試験体と比べると、同じせん断破壊でも、スタッドレール補強筋によりせん断補強した試験体は、曲げ破壊が混在した形でせん断破壊することが明らかとなった。これは、スタッド筋によるせん断抵抗への関与により、接合部のせん断耐力が増加し、せん断破壊から曲げ破壊に移行したものと思われる。また、無数の斜めひび割れを伴うこととなり、ひび割れの分散化も図れたものと思われる。但し本実験の範囲では、ひび割れ性状そのものにスタッドレール補強筋の配置方法の違いによる影響が生じていなかった。

3.2 せん断力 - 変形角曲線

せん断力 - 変形角曲線の関係を図 - 3 に示す。

無補強とした試験体は、変形角 $R=15 \times 10^{-3}$ rad で最大耐力に到達後、脆性的なせん断破壊を生じ、耐力が著しく低下した。この曲線形状は典型的なせん断破壊の性状を示していた。

スラブ内のみスタッドレール補強筋を施した試験体 + - N - SR 1 は、接合部でのせん断ひび割れの発生とともに剛性が変化し、変形角 $R=19 \times 10^{-3}$ rad 時に曲げ降伏した。曲げ降伏後は、緩やかに耐力が上昇し、最大耐力に至った。最大耐力に至った時点では、耐力が一旦低下し、最終サイクル時に接合部内のせん断ひび割れの進展とともにスタッド筋が降伏した後、破壊へと至った。この曲線形状は、最

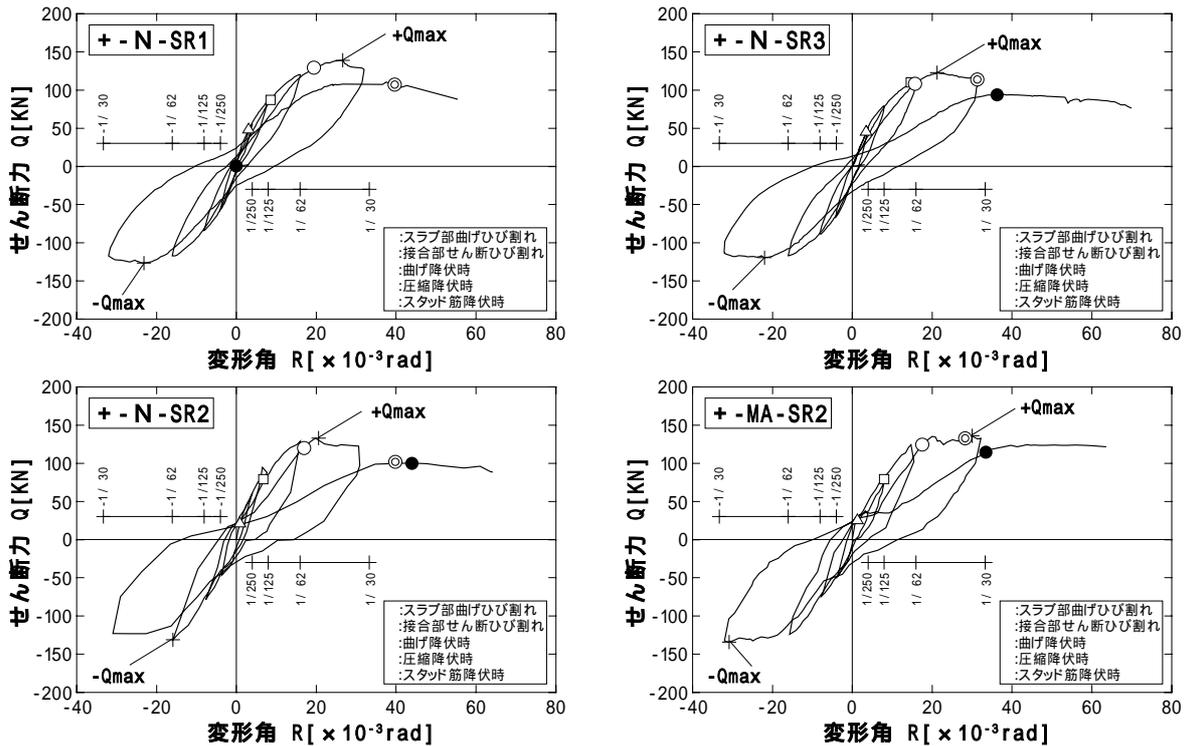


図 - 3 せん断力 - 変形角曲線

大耐力付近までは曲げ系の挙動を示しているが、最大耐力に至った後は、曲げ降伏後のせん断破壊の様相を示していた。

スラブから接合部を貫通してせん断補強した試験体 + - N - SR3 は、上記試験体と曲線形状そのものに大きな違いは見られなかった。但し最大耐力直後の耐力低下は、緩やかな勾配を示した。しかしスタッド筋の降伏が、上記試験体は $R=40 \times 10^{-3}$ rad 時であったのに対し、 $R=31 \times 10^{-3}$ rad 時と、比較的早い段階で降伏した。更にその後、最終サイクルでスラブ筋の圧縮降伏が確認された。

スラブ内のみならず柱内にもせん断補強した試験体 + - N - SR2 は、上述 2 体の試験体と比較して初期剛性が幾分高い傾向を示した。しかしその後の形状に大差は見られず、ほぼ同様な挙動を示した。最大耐力時変形角についても、試験体 + - N - SR3 と殆ど同じ変形角時に得られている。スタッド筋の降伏は、試験体 + - N - SR1 と、ほぼ同様な変形角であるが、この試験体についてもスタッド筋降伏後、スラブ筋の圧縮降伏が確認された。従って、同一比較は出来ないが、試験体 + - N - SR1 と比較すると、柱内のスタッドレール補強筋は、本実験の範囲ではあまり有効に作用しなかったものと思われる。

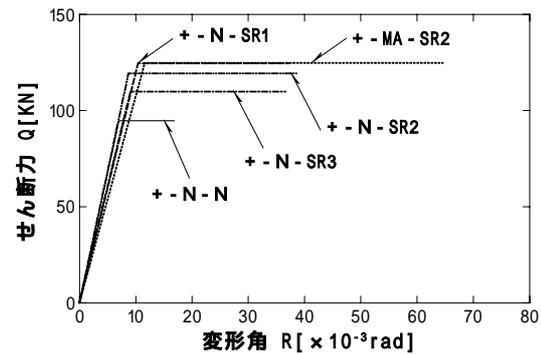


図 - 4 完全弾塑性モデル

試験体 + - N - SR2 のせん断補強のほか、接合部を貫通するスラブ筋に定着版を設けた試験体 + - MA - SR2 についても、曲線形状そのものは、ほぼ同様な形状を示した。但し、この試験体に関しては、最大耐力が得られる直前にスタッド筋が降伏した。なお、スラブ筋の圧縮降伏が、試験体 + - N - SR2 と同じ変形角時に生じた。一方、最大耐力からの耐力低下は、他の試験体と比較して一番小さい傾向を示した。これは、接合部内でコンクリートの圧縮ストラットと釣り合うスラブ筋の付着応力が増加し、接合部の保有耐力が増加したためと思われる。

以上の傾向から、補強した試験体は、全て曲げ降伏が先行し、最大耐力に至ったことが明らかとなった。最大耐力以降は、多少の耐力低下は見られるも

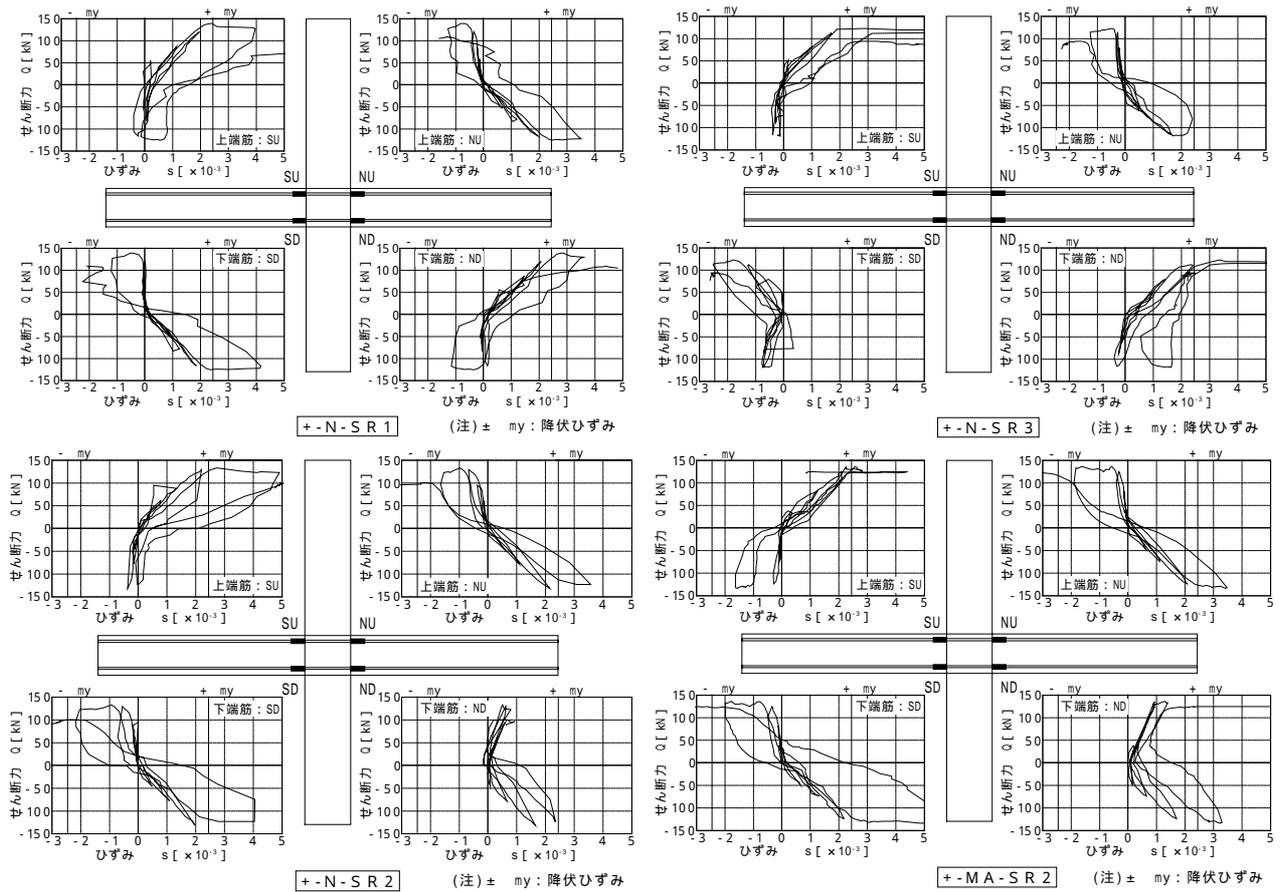


図 - 5 スラブ筋のひずみ性状

のの曲線が横ばいとなり、接合部内のせん断ひび割れが進展した。これによりスタッド筋が降伏する形となった。これらの性状から、いずれも曲げ降伏後のせん断破壊を生じたことと思われる。一方、無補強とした試験体については、スラブ筋が降伏せずに最大耐力に至り、脆性的なせん断破壊を示した。最大耐力そのものも、他のせん断補強した試験体より低い値を示した。これより、スタッドレール補強筋によるせん断補強効果が認められ、せん断補強筋として有効に寄与することが検証された。但し、試験体条件の違いによる曲線形状及び最大耐力そのものに大きな違いは見られなかった。そこで、履歴曲線から得られた包絡線を完全弾塑性にモデル化することで、各試験体との比較を行った。なお第1勾配は、初期剛性をもとに算出し、また包絡線上の最大耐力から80%耐力が低下した時の点を限界時と仮定した。またモデル化の際には、限界時までの包絡線とX軸とで囲まれるエネルギーと完全弾塑性によるエネルギーが等しくなるようにモデル化した。図-4より降伏時の変形は、無補強とした試験体と

せん断補強した試験体にさほどの違いはないが、せん断補強した試験体は、塑性率が約4倍以上あり、靱性性状が向上していることが分かる。また試験体+ - N - SR1は、試験体+ - MA - SR2と降伏耐力が殆ど同じであるが、限界時変形角に大きな差が見られた。なお試験体+ - MA - SR2は、限界時の変形が他の試験体と比較して最も優れていた。従って、完全弾塑性にモデル化した曲線から、スラブと柱にスタッドレール補強筋によりせん断補強し、更にスラブ筋に定着版を有することで、せん断挙動は大きく改善されることが明らかとなった。なお試験体+ - N - SR3は、実験時のコンクリート圧縮強度が試験体+ - N - SR1より若干小さいため、降伏耐力が小さい値を示した。但し、限界時の変形に差は見られなかった。

3.3 スラブ筋のひずみ曲線

接合部近傍のスラブ筋のひずみ性状について、せん断力-ひずみ曲線の関係で、図-5に示す。

全体的な傾向としては、前項でも述べたように、せん断補強した試験体は、いずれも最大耐力前にス

ラブ筋が降伏した。また、その後もひずみが著しく進展する形となった。4つの試験体の中では、スラブ内にみにせん断補強した試験体+ - N - SR1の値が他の試験体と比べ幾分小さい。これは最大耐力後の耐力低下が、補強した試験体の中では比較的大きく、抵抗曲げモーメントの割合が小さかったためと思われる。なお、無補強とした試験体は、せん断補強した試験体の値と比べかなり小さく、降伏にも至っていない。このことから、スタッド筋によるせん断補強効果が発揮したことにより、接合部のせん断耐力が向上し、曲げ降伏先行後のせん断破壊に至ったことが窺える。

また、一部のひずみ(+ - N - SR3のSD, + - N - SR2及び+ - MA - SR2のND)に、X軸でほぼ対称となる極めて特徴的な傾向が現れていた。これはスラブに生じたねじれが影響しているものと思われる。パンチング破壊時にスラブが伝達する鉛直力とモーメントには、曲げ、せん断及びねじれにより伝達されるモーメントに影響する。本試験体は、1方向スラブであるため、本来はねじれモーメントが生じないものと考えられる。しかし、接合部側面に発生したせん断ひび割れの進展が起因して、スラブの一部にねじれが生じ、特異的な挙動を示したものと思われる。なお、本試験体における最大荷重は、柱位置を危険断面とし、スラブを梁と見なした時の略算式²⁾による曲げ耐力に対して、いずれも5割程度であり、曲げによる影響は少ないものと考えられる。

3.4 スタッド筋のひずみ曲線

図 - 6 に各サイクル(正加力)時のスタッド筋のひずみ分布を示す。

全体的な傾向としては、スタッド筋に作用するひずみは、接合部内にせん断ひび割れが発生し、主筋が降伏するレベルまでは、それぞれ余り大きな値を示していない。最大耐力時においても降伏には至っていないが、柱に最も近いスタッド筋のひずみが、他に比べて著しく増加することが認められる。最大耐力以降の最終サイクル時は、いずれのスタッド筋のひずみも、大きく進展する傾向を示した。但し降伏に至った位置は、柱際に位置するスタッド筋のみで

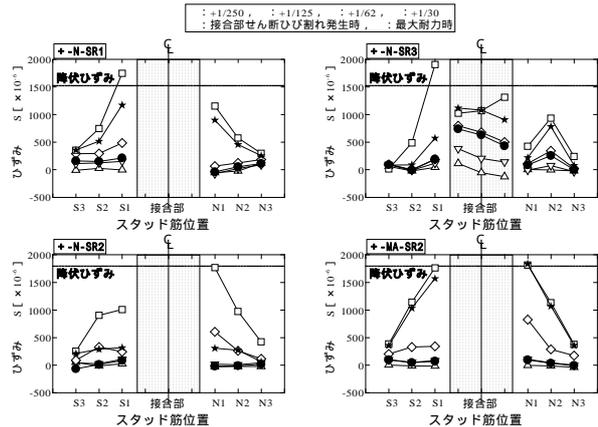


図 - 6 スタッド筋のひずみ分布

ある。従って、柱際に危険断面が形成され、スタッド筋のせん断抵抗が最も大きく作用したと思われる。一方、接合部内にもスタッドレール補強筋を配した試験体+ - N - SR3を見ると、接合部内のひずみが両端スラブのひずみより最大耐力レベルまで大きな値を示している。これより、接合部内のスタッド筋が柱 - スラブ接合部に生じるせん断力に対して抵抗していることが見受けられる。

4. まとめ

以上より、スタッド筋を有する柱 - フラットプレート接合部のせん断挙動について調べた実験結果より、以下の知見が得られた。

- (1) スラブ内にスタッドレール補強筋を持たない試験体はせん断破壊を生じたが、スラブ内にせん断補強を配した試験体は、曲げ降伏先行後のせん断破壊を生じた。これより、スタッドレール補強筋は、せん断補強筋として有効に寄与することが検証された。
- (2) 柱 - スラブ接合部において、柱内にはせん断ひび割れは生じていないことも確認された。
- (3) 柱 - スラブ接合部に配されたスタッド筋において、ひずみが最も大きく発現していることから、接合部内のせん断補強筋も接合部に作用するせん断に対して抵抗要素として有効であることも認められた。

参考文献

- 1) R.Park,W.L.Gamble:Reinforced Concrete Slabs, Second Edition, John Wiley and Sons,INC. pp551 ~ 620, 2000
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp89 ~ 100, 1999