

論文

[2115] RC柱はり外部接合部の挙動に与える載荷履歴の影響

正会員 〇角 徹三 (豊橋技術科学大学工学部)

正会員 浅草 肇 (豊橋技術科学大学工学部)

佐野友治 (竹中工務店東京本店第二総括事務所)

赤塚 剛 (豊橋技術科学大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下RCと略記) 造建物の柱・はり接合部に関する実験的研究は、この数年間に急速に増大してきたが、そのほとんどが、地震時を想定した正負交番繰返し載荷を採用している。接合部の実験は他の部材実験に比べて加力・計測装置が大がかりとなり、一方向単調載荷で破壊させるのが「もったいない」の感を研究者に抱かせているのもその一因であろう。しかし、繰返し載荷が接合部内の応力伝達機構にどのような変化をもたらすかを明確にするには、部材実験の基本である一方向単調載荷試験も並行し、両者の挙動の相違を検討することが重要であると考えられる。本論文では、著者らの既往のRC柱・はり外部接合部の正負繰返し実験¹⁾から標準的な配筋の試験体を1体選び、今回新たに追加した同一配筋の試験体2体の単調載荷試験結果とを併せて、載荷履歴の影響を詳細に検討する。藤井らが提案している接合部内のせん断力伝達機構モデル²⁾の検証のための基礎資料を提供することも意図している。

2. 実験概要

2.1 実験計画

この報告で取り扱う試験体は、図1に示すような形状の次の3体である。①標準的な試験体として、繰返し載荷を加えた試験体の中から、柱主筋が分散配置(12-D10)で、フープ筋比が0.49%、柱軸力が0であるNa9試験体¹⁾を選び出した。②今回新たに①と同一条件で作成し、単調に載荷したNa21試験体。③はり主筋にのみ高強度の鉄筋を使用し、他は①②と同一条件で作成し、単調に載荷したNa22試験体。

以上の3体の試験体を対象として考察・検討を加える。Na9とNa21は繰返し載荷と単調載荷の影響を比較検討するための試験体である。Na21とNa22はいずれも単調載荷であるが、はり主筋の降伏点が上昇することにより接合部入力せん断力が高くなった場合の影響を比較検討する試験体である。なお、加力方法・変形測定方法については文献¹⁾に詳細に示されている。

2.2 試験体

試験体の形状、断面寸法は図1に示すとおり

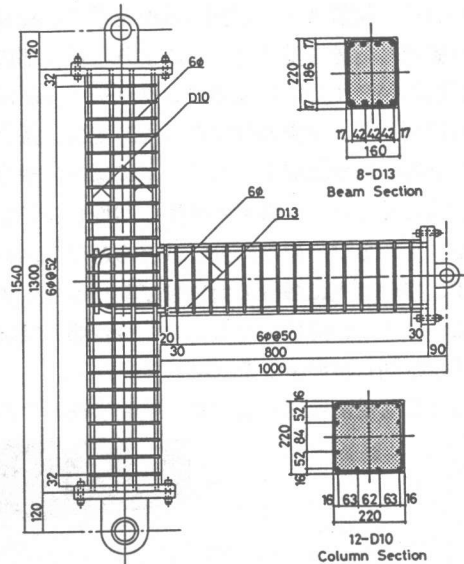


図1 試験体図

表1 使用材料の物理的性質

No	Specimen	f _c (MPa)	Yield point (MPa)		
			D13	D10	R6
9	4D10・8D10・H6+00	40.6	391	395	250
21	4D10・8D10・H6+00M	35.5	360	350	283
22	4D10・8D10・H6+00M	40.6	950*		

* Stress at residual strain of 0.002.

である。使用した鉄筋の物理的性質を表1に、各試験体の断面性能を表2に示す。No.9、No.21は、いずれも、はり降伏先行型として設計されている。No.22は、はり主筋の降伏点を高くして柱降伏先行型としていること

表2 試験体の断面性能

No.	Moment capacity			
	cM_u (KN·m)	bM_u (KN·m)	cM_{bu} (KN·m)	cM_{bu} cM_u
9	32.8	37.8	18.2	0.56
21	28.8	34.3	16.5	0.57
22	29.2	99.6	48.0	1.64

cM_u : Flexure strength of column.
 bM_u : Flexure strength of beam.
 cM_{bu} : Bending moment of column at $bM = bM_u$.

がわかる。また、No.22のはり主筋に用いた高強度鉄筋は異形鉄筋ではあるが、その表面は丸鋼に極めて近い状態であった。

3. 実験結果

実験結果の概要を表3に示す。No.9、No.21では最初にはり主筋が降伏した。No.22では柱主筋が最初に降伏した。最終的な破壊性状は、次のようである。No.9は変位振幅の増大に伴い接合部コアがせん断破壊をした。No.21ははりの接合部近傍が曲げ破壊をした。No.22ははり主筋の抜け出し量が大きくなり接合部が破壊した。

3.1 破壊状況並びに変形状態

図2に3試験体のひび割れ状況を示す。No.9試験体では繰返し荷重を受けたことにより、接合部に多くのひび割れが発生し、表面のコンクリートが剝落した。これに対して、単調載荷であるNo.21では、接合部内のひび割れの数が比較的少なく、主にはりの接合部境界面近傍にひび割れが数多く発生し塑性ヒンジ状態となった。No.22では、はり部分にほとんどひび割れが発生せず、接合部内に多数の斜めひび割れが発生するとともに、柱主筋の降伏にともない、接合部の柱境界面に曲げひび割れが発生した(写真1参照)。

図3に荷重変位関係を示す。縦軸は柱のせん断力、

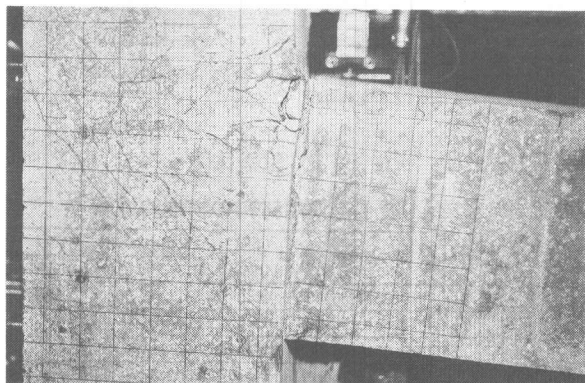


表3 実験結果の概要

No.	Test result			
	Q_{cy} (KN)	θ_y $\times 10^{-2}$ (rad)	Q_{cmax} (KN)	Failure mode
9	25.8	0.95	33.5	BY→JS
21	25.9	0.92	35.8	BY→BF
22	31.1	1.37	35.9	CY→JF

Q_{cy} : Column shear force at yielding of beam bar.
 θ_y : Story drift angle at Q_{cy} .
 Q_{cmax} : Maximum column shear force.
Failure mode
BY→BF: Flexural failure in beam after yielding of beam bars.
BY→JS: Shear failure in joint after yielding of beam bars.
CY→JF: Failure in joint after yielding of column bars.

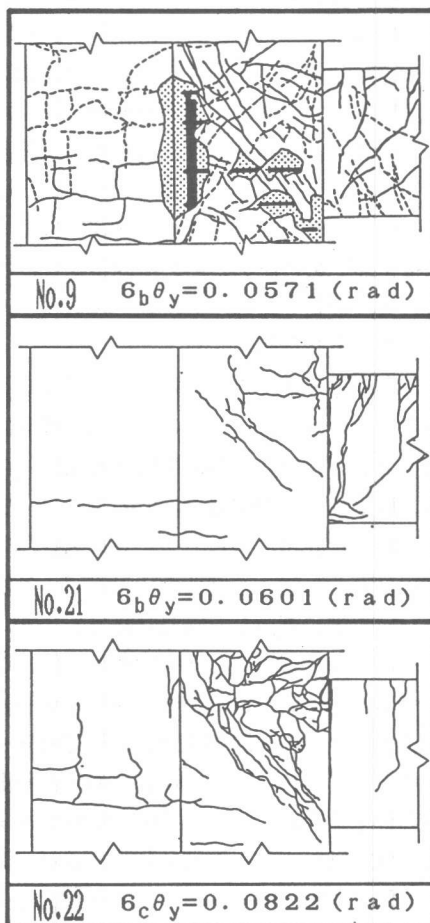


図2 ひび割れ図

写真1 $6\theta_y$ 時のひび割れ状況 (No.22)

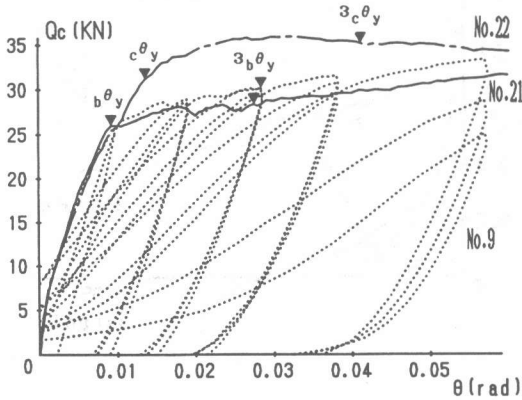


図3 荷重変位関係

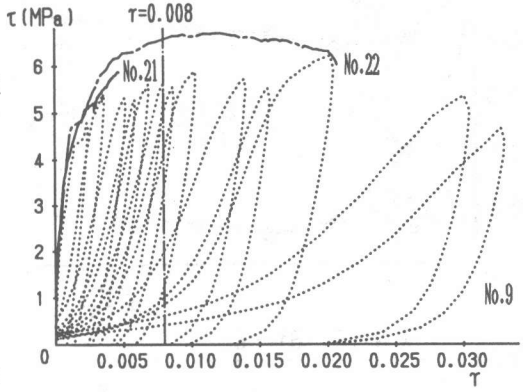


図4 せん断応力せん断変形角関係

横軸は層間変形角である。No.21はNo.9の包絡線にほぼ一致し、はり主筋の降伏後も耐力は緩やかに増加し続ける。一方、No.22では柱主筋の降伏後も耐力は上昇するがその勾配は徐々に緩やかになり、やがて最大耐力となる。その後、耐力は徐々に減少を始める。

図4に接合部コアのせん断応力せん断変形角 ($\tau - \gamma$) 関係を示す。はり主筋の水平投影長さにはり幅と柱幅の平均値を乗じた値を断面積として、せん断応力を算出した。繰返し荷重を受けたNo.9では、 $\gamma = 0.008$ を超えると急激な γ の増加を示すが、No.21では γ は大変形 ($8\theta_y$) に至っても $\gamma = 0.008$ を超えておらず、非常に小さい。No.22では $2\theta_y$ のときに $\gamma = 0.008$ を超えるが、No.9と比較すると γ は小さい。

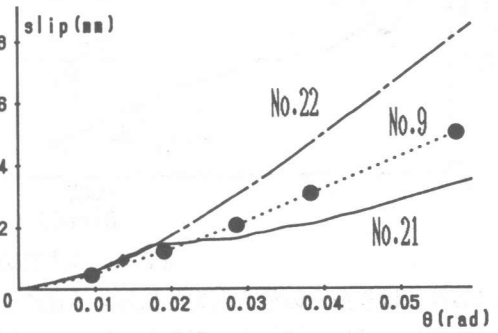


図5 はり主筋の抜け出し量 層間変形角関係

図5にはり主筋の抜け出し量と層間変形角との関係を示す。No.9はNo.21と比較すると抜け出し量が多く、繰返し荷重によりはり主筋の抜け出し量が増加することがわかる。No.22では抜け出し量が極端に多くなり、これが接合部破壊の原因となった。

図6に変位成分の構成比率を示す。単調載荷 (No.21) では、繰返し載荷 (No.9) に比較してせん断変形に起因する成分が少なくなり、はりの曲げ変形に起因する成分が多くなる。No.22でははり主筋の抜け出しに起因する成分が大きくなるのが特徴である。

3. 2 はり主筋の応力状態

図7にはり主筋の接合部内における付着力の分担率を示す。縦軸は、図中に示す接合部境界面

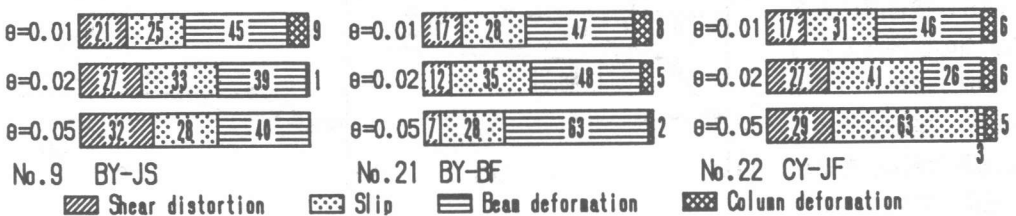


図6 変位成分構成比率

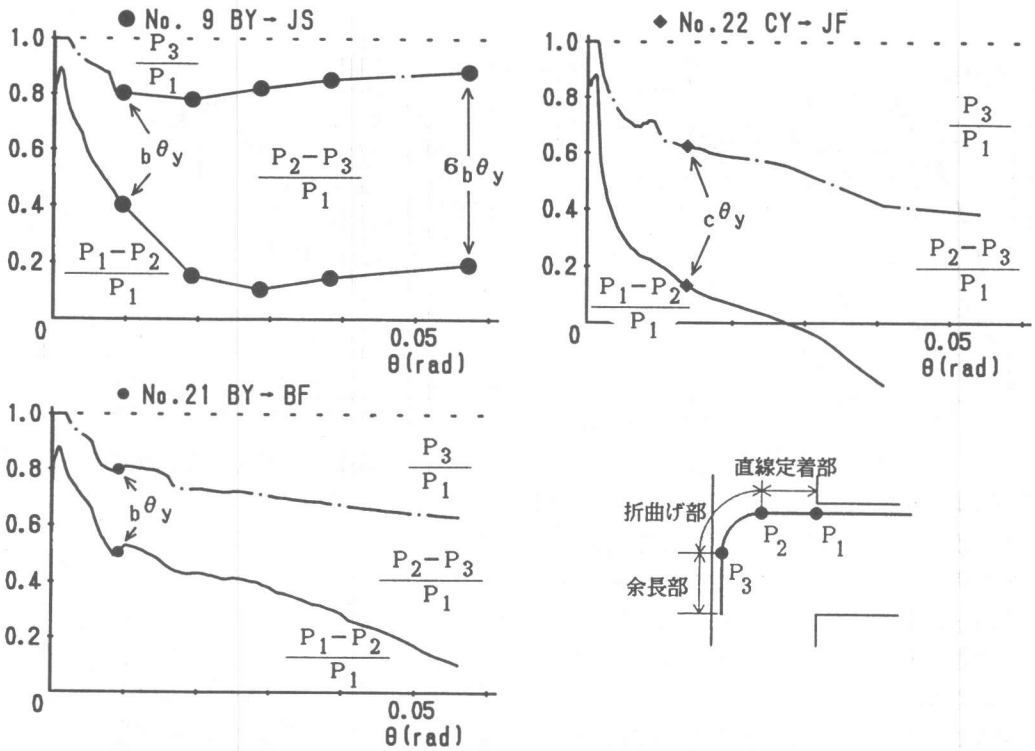


図7 はり主筋の接合部内付着分担率

におけるはり主筋の軸方向力 P_1 に対する比率を表し、下から順に、直線定着部、折曲げ部、余長部で負担している付着力に対応している。3試験体とも変位が極めて小さいときには直線定着部で80%以上の付着力を負担しているが、その後変位の増大とともに直線定着部での負担分が減少する。この減少の仕方は繰返し載荷(No.9)と単調載荷(No.21)を比較すると、繰返し載荷の場合に顕著であり、 $\theta=1/50\text{rad}$ 以上の変位では、直線定着部での付着力は20%以下となり、70%以上を折曲げ部で負担している

ことがわかる。No.22では直線定着部での負担力は急激に減少し、最大耐力以降は負の値となる。

3.3 柱主筋の応力状態

図8に接合部柱上下境界面の柱隅筋の応力と層間変形角との関係を示す。縦軸はそれぞれ鉄筋の降伏応力で無次元化している。接合部のはり面側の鉄筋

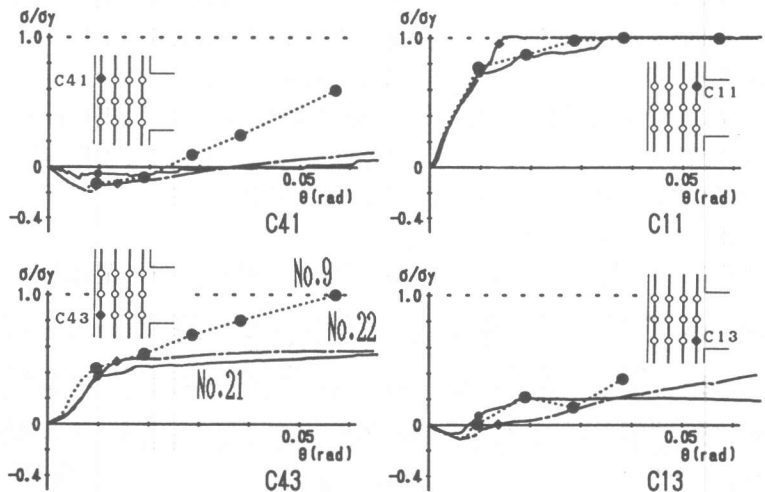


図8 柱主筋応力-層間変形角関係

(C11)では載荷方法による相違は小さく、自由面側の鉄筋(C41C43)では繰返し荷重を受けると引張側に応力が大きく変化する。

図9では、図8に示した鉄筋の実験値と計算値の応力を各試験体ごとに比較した。計算値は平面保持を仮定した曲げ解析から決定した。繰返し載荷(Na9)を受けると、実験値は計算値よりも大きく引張側に変化する。単調載荷(Na21, 22)の場合には下部境界面の鉄筋(C43C13)の挙動に特徴がある。すなわち、C13は計算値に比較して引張側に応力が大きくなっており、C43はNa9とは逆に小さくなっている。

図10にNa9とNa21の下部境界面における、 $\theta=1/25\text{rad}$ のときの柱主筋の応力分布状況を示す。この図から、単調載荷の場合に、C13は付着が劣化するためにはC11の応力の影響を受けて引張側に変化する。このために下部境界面では力のつり合いを満足させるために、反対側のC43の応力が小さくなり柱主筋4本の値が平均化している

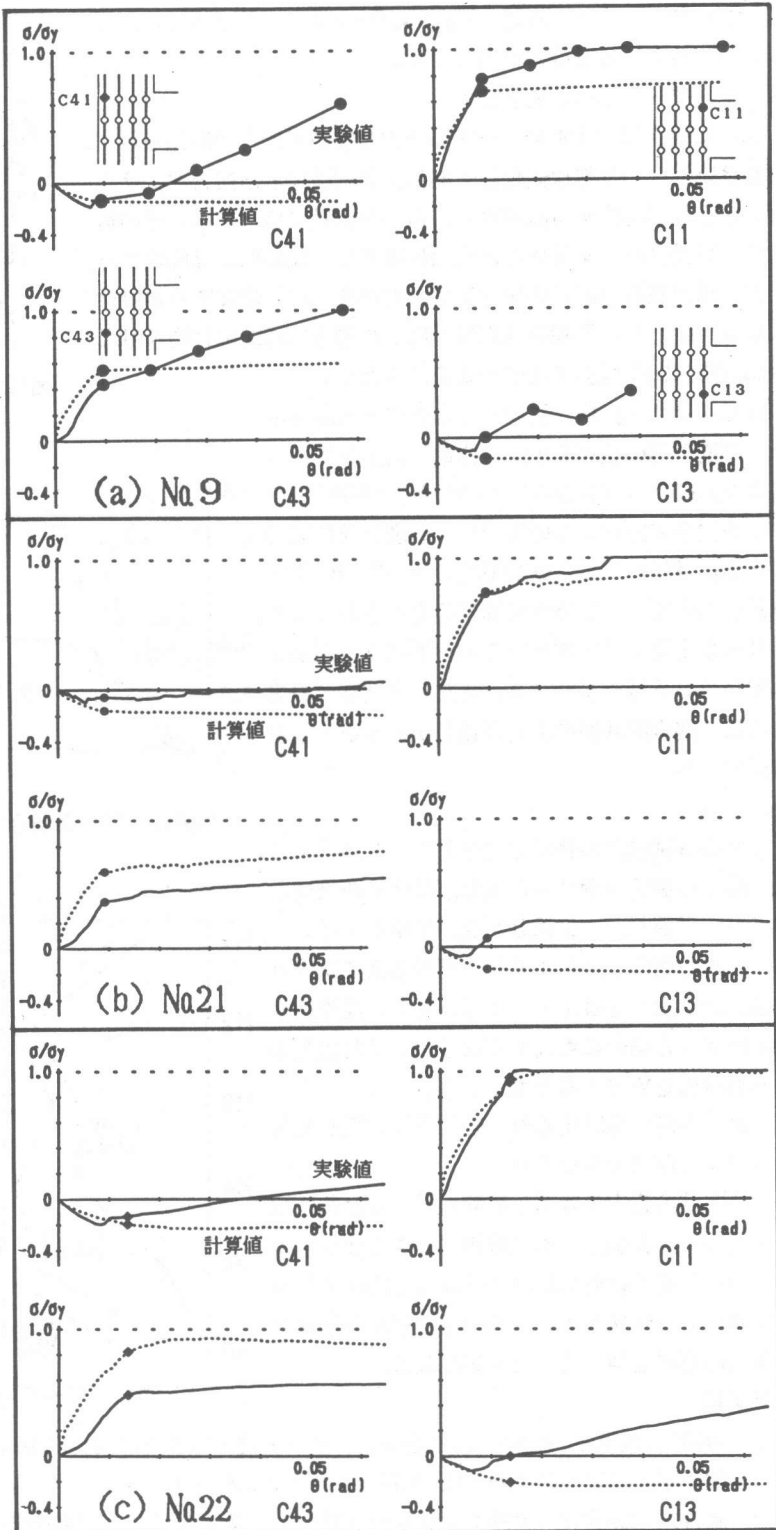


図9 柱主筋応力の実験値と計算値の比較

ことがわかる。また、繰返し載荷(Na9)を受けると全体的に引張側に変化している状態が理解できる。

3.4 フープ筋の応力状態

図11に接合部内4本のフープ筋合力と層間変形角の関係を示す。縦軸は降伏合力で無次元化している。3試験体とも接合部にせん断ひび割れが発生する直前から、合力が急激に増加する。その後、繰返し荷重(Na9)を受けると合力は増加し、最終的には降伏する。一方、単調載荷(Na21)の場合には合力が緩やかに増加するが降伏はしない。また、高強度鉄筋を使用した場合(Na22)には約 $\theta=1/5$ 0rad以降に90%程度でほぼ一定の値を保つ。

図12に $\theta=6\theta_y$ (約1/20rad)のときの3試験体のフープ筋応力の状況を示す。繰返し荷重を受けた場合(Na9)には接合部内(H2~H5)と上部(H1)のフープ筋は全て降伏するのにに対し、単調載荷(Na21)の場合にははりの引張鉄筋位置のフープ筋の応力(H2)が最も高く、下方向に順に応力が小さくなり、はり引張主筋から伝達された力を順次フープ筋が負担している様子がわかる。また、単調載荷の場合には、接合部外側の応力(H1H6)が小さいことが特徴である。

4. 結論

今回の3試験体の範囲では以下のことが言える。

- ① 繰返し載荷を受けると接合部はせん断破壊をするが、単調載荷でははりが曲げ破壊をする。
- ② 繰返し載荷と比較すると、単調載荷でははり主筋の抜け出し量は小さくなる。また、高強度鉄筋を使用した場合にも大きくなるが、これはその表面形状のためであると推定できる。
- ③ はり主筋の直線定着部での付着は繰返し載荷を受けると期待できなくなる。
- ④ 柱主筋の応力は繰返し載荷を受けると曲げ解析に基づく計算値よりも引張側に大きく変化する。
- ⑤ フープ筋は繰返し載荷を受けると降伏するが、単調載荷では降伏せず、はり引張主筋から伝達される力の影響を強く受けた分布となる。

参考文献

- 1) 角徹三、浅草肇、青木正美:鉄筋コンクリート柱・はり外部接合部を含む架構の靱性評価、日本建築学会構造系論文報告集、第401号、1989、pp.87~96
- 2) 藤井栄、森田司郎:鉄筋コンクリート外部柱・梁接合部のせん断抵抗機構、日本建築学会構造系論文報告集、第398号、1989、pp.61~71

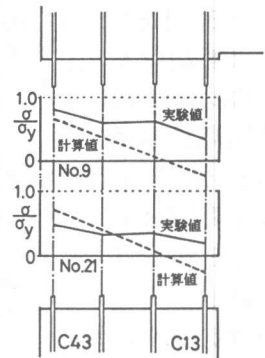


図10 接合部下境界面の柱筋の応力分布

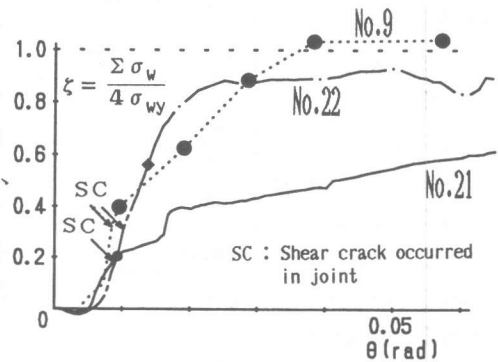


図11 フープ筋合力と層間変形角関係

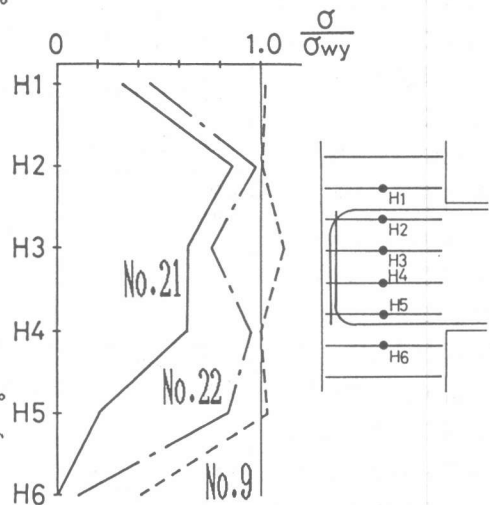


図12 フープ筋応力の分布