

論文 主鉄筋の定着不良を有するディープビームにおけるスターラップの補強効果

兼子 弘^{*1}・細田 暁^{*2}・讓尾 美里^{*3}

要旨: 主鉄筋に定着不良を有するディープビームにおいて、スターラップの補強効果や耐荷性状を検討した。スターラップの有無や鋼材径および配置間隔をパラメータとし、斜めひび割れ発生後の剛性や主鉄筋のひずみに与える影響を実験的に検討した。その結果、細径のものを密に配置したものにおいて、せん断スパン内のスターラップが補強効果を発揮し、付着除去によるすべりを抑え、斜めひび割れ発生後の剛性が大きくなることを確認した。さらに、3次元 FEM プログラムにより、スターラップによる補強効果を分析した。

キーワード: 定着不良, スターラップ, せん断破壊, ディープビーム, 3次元非線形解析

1. はじめに

アルカリ骨材反応 (以下 ASR) によるコンクリートの膨張圧による鉄筋折曲げ部での破断¹⁾や、凍結防止剤の使用による部材端部の鉄筋腐食などから、主鉄筋の定着不良が生じる場合がある。また、塩害による鋼材腐食や、引張を受ける主鉄筋に沿うひび割れによって、鉄筋の付着が低下する²⁾。この主鉄筋に沿うひび割れが発生すると、付着・定着には致命的な状況であり、その部材や構造物の破壊に直接つながることが多く危険である。

主鉄筋に定着不良を有するディープビームでは健全な梁に比べ、破壊荷重や斜めひび割れ発生後の剛性が大幅に低下する³⁾ことが明らかにされている。しかし、これらの悪影響は、スターラップのないディープビームで確認されたものである。実際の橋脚梁部ではスターラップが配置されており、主鉄筋のみ配置した供試体で定着不良の影響を検証するのは不十分である。

ディープビームでは、せん断補強鉄筋によるせん断耐力向上の効果を、通常の鉄筋コンクリート部材と同様には評価できない⁴⁾こともあり、主鉄筋に定着不良を有するディープビームにおけるスターラップの補強効果を検討することとした。

本研究では、スターラップの有無や鋼材径および配置間隔をパラメータとし、主鉄筋に定着不良を有するディープビームの静的載荷実験を行う。この実験を対象として3次元 FEM 解析を行い、スターラップの補強効果や耐荷性状を検討する。

2. 実験概要

支点近傍に主鉄筋の定着不良を有するディープビームにおける、スターラップの補強効果を調べた。スターラップの鉄筋比を一定にして、配置間隔を変化させた。

2.1 供試体概要

スターラップで補強しない供試体は、既報³⁾において剛性の低下が最も著しかったものと同じ諸元を有する。供試体の断面形状は幅 200mm×高さ 300mm、有効高さ 260mm、供試体長さ 1800mm、 a/d は 1.73 である。支点からフック折曲げ部までの長さを 310mm と十分に取った。せん断破壊先行とするため、せん断耐力を曲げ耐力に達するときのせん断力で除した値を 1.0 以下とした。せん断耐力の算定には二羽らの式⁵⁾を用いた。

供試体諸元を表-1、供試体概要を図-1、鉄筋の材料特性を表-2 に示す。再現性を考慮して同一条件の供試体を2体作製した。主鉄筋として D22 の異形鉄筋を3本配置し、フック折曲げ部から 460mm の区間を付着除去することによって、定着不良を模擬した。N は主鉄筋のみ配置したものである。付着を除去する際には、鉄筋のふし間をロウで埋め、丸鋼のようになるように余分なロウを削り、その上にグリスを塗りビニールテープで巻いた。

ST6 と ST13 はスターラップを配置したもので、どちらもスターラップ鉄筋比を 0.422% とした。これは標準示方書の最小鉄筋量の規定を満たし、かつ ASR 報告書¹⁾の安全性照査で取り扱われた一般橋脚梁部の鉄筋比を目安に設定したものである。細径のものを密に配置したものと、太径のものを疎に配置したものにおいて、スターラップの補強効果に明確な違いが現れるかを主眼に置き、D6、D13 の異形鉄筋をそれぞれ 75、300mm 間隔で配置した。ST13 においては、せん断スパン 450mm 内にタイドアーチ機構を形成した場合を想定して、支点中心からスパン内側に 100mm、載荷板中心から 50mm に狙いをつけ、左右対称になるよう配置した。圧縮鉄筋として D6 の異形鉄筋を2本配置し、スターラップを U 形に加工し

*1 横浜国立大学 大学院環境情報学府 環境システム学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 准教授 博(工) (正会員)

*3 大和ハウス工業株式会社 東京支社 設計施工推進部 建築系施工技術者育成プロジェクト

表-1 供試体諸元

供試体	主鉄筋	スターラップ			f_c (MPa)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形態			
	付着除去 (mm)	鉄筋径	間隔 (mm)	鉄筋比 (%)							
N-1	460	-	-	-	36.4	92	262.1	主鉄筋の付着破壊			
N-2						105.2	175.3	せん断圧縮破壊			
ST6-1						D6	75	0.422	85.9	259.4	せん断圧縮破壊
ST6-2									76.3	304.2	せん断圧縮破壊
ST13-1						D13	300	0.422	89.4	148.1	せん断圧縮破壊
ST13-2									88.5	192.8	せん断圧縮破壊

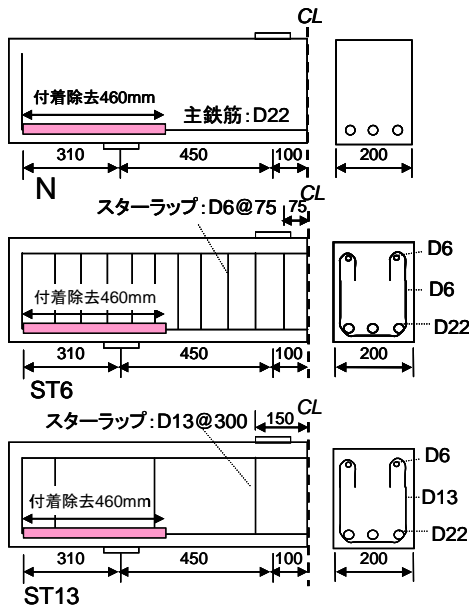


図-1 供試体概要 (単位は mm)

表-2 鉄筋の材料特性

呼び名	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)
D22	381	553	185
D6	303	509	187
D13	350	489	189

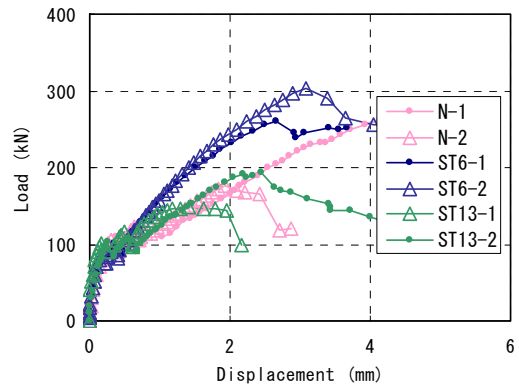


図-2 荷重変位関係

てフックを圧縮鉄筋に定着した。

2.2 荷重方法と変位・ひずみ計測位置

荷重分配桁を用いて2点集中荷重を静的に単調荷重した。荷重板及び支承板には100mm幅の鋼板を用いた。斜めひび割れ発生までは10kN毎のステップで荷重制御により荷重し、斜めひび割れ発生以降は荷重の増減を伴うので変位制御で荷重した。測定項目は供試体スパン中央部の下面で測定した鉛直変位、主鉄筋のひずみ、スターラップのひずみである。

3 実験結果

3.1 斜めひび割れ発生後の剛性

図-2に荷重とスパン中央の変位の関係を示す。スターラップで補強しない基準供試体Nでは、斜めひび割れ発生後の剛性が、既報³⁾における同条件の供試体と同程度の剛性となっており、主鉄筋の定着不良により剛性が低下しているものといえる。

ST6においては、斜めひび割れ発生荷重がNと比べて若干小さいが、斜めひび割れ発生後の剛性が明らかに大きくなり、破壊荷重も大きい値を示した。剛性の急変した斜めひび割れ発生時にひび割れ性状を確認したところ、Nと比べて明らかに斜めひび割れが抑制されているのを

目視で確認でき、これはスパン内のスターラップがひび割れ幅を抑制したものと考えている。

一方、ST13においては、斜めひび割れ発生後に耐力はあまり増加せずに破壊に至り、剛性もNと同様であった。剛性、破壊性状の観点からは、スターラップの補強効果がほとんど無いように見えた。

3.2 ひび割れの状況と破壊形態

図-3に荷重後の斜めひび割れ発生状況を示す。全ての供試体において、付着除去区間端部近傍(フック折曲げ部から460mm)から斜めひび割れが進展することを確認した。斜めひび割れは、付着除去区間の端部に発生した曲げひび割れを起点としているようであった。

斜めひび割れがせん断スパン内の荷重板の脇を突き抜けて、その後せん断圧縮破壊したN-2とは異なり、N-1は斜めひび割れが荷重板下にもぐり込むように進展し、斜めひび割れ発生後もさらに大きな荷重に耐えることができた。またN-1は、主鉄筋が抜け出そうとすることにより梁端部上縁に鉛直にひび割れが進展し、最終的には定着部全体が崩壊した。

ST6においては、Nに比べて斜めひび割れ近傍に、細かいひび割れが分散していた。スターラップの付着効果により斜めひび割れが分散したものであろう。

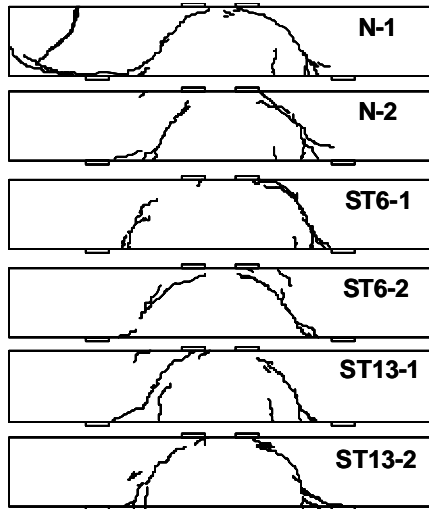


図-3 斜めひび割れ発生状況

一方 ST13 においては、付着除去区間端部近傍から進展した斜めひび割れは、450mm のせん断スパン内に2箇所配置したスターラップとはわずかにしか交わらなかった。

本実験における最大荷重は、斜めひび割れの発生位置などにより大きく異なる結果となった。斜めひび割れの先端が載荷板の下にもぐりこまない場合は、破壊音を伴う明確なせん断破壊を示し、最大荷重は比較的小さかった。次章では FEM 解析により検討を行うが、最大荷重よりは、斜めひび割れ発生後の剛性を適切にシミュレーションできるか、に主眼を置くことにした。

3.3 鉄筋のひずみ分布

図-4 に、ひずみの測定箇所を、図-5~7 に7箇所計測した主鉄筋のひずみ分布を、図-8, 9 に、スターラップひずみ分布を示す。

図-5~7 から全ての供試体において、斜めひび割れ発生直後、支点からフック折曲げ部までの主鉄筋ひずみが上昇することがわかる。

N は、斜めひび割れ発生後、7 箇所の主鉄筋ひずみの値がほぼ一定でフラットになる。これは、付着除去区間ですべりが生じ、主鉄筋は部材端のフック折曲げ部までがアーチ機構の引張材となったことを示している。それ以前の梁の耐荷機構から、アーチ機構へ移行し、その中で鉄筋は軸方向にほぼ一様な引張力を受け持っている。

ST13 の場合も、N とほぼ同様の主鉄筋ひずみの分布となった。このことから、ST13 においては、スターラップの補強効果はほとんど発揮されていないと判断した。

ST6 においては、斜めひび割れ発生後、梁中央部のひずみが増加し、N と比べてひずみ全体の形状が異なり山形である。一方、せん断スパン中央部のスターラップにかなり大きなひずみが生じ、降伏ひずみに達している。斜めひび割れ発生後に主として斜めひび割れを横切るス

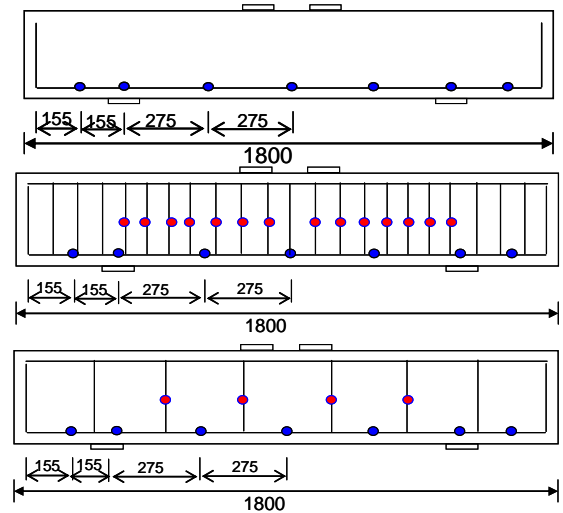


図-4 ひずみ測定位置 (単位は mm)

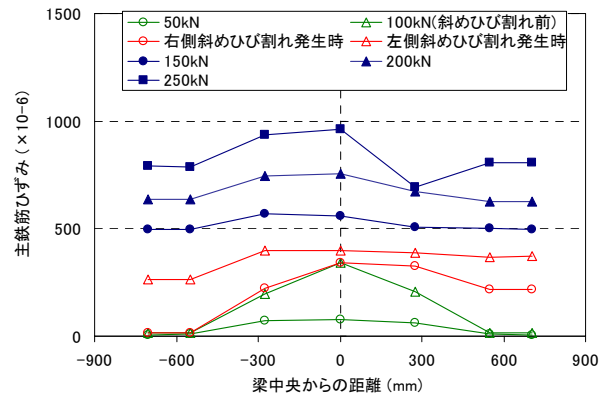


図-5 主鉄筋ひずみ分布 (N)

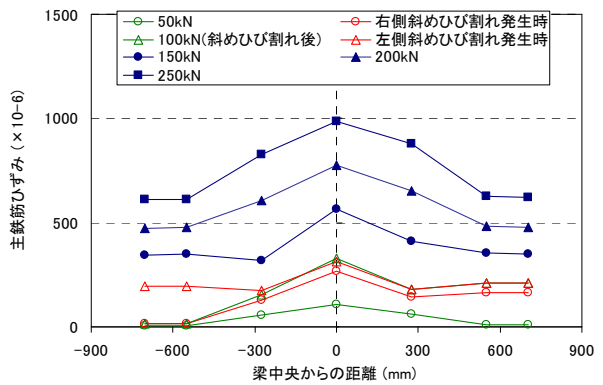


図-6 主鉄筋ひずみ分布 (ST6)

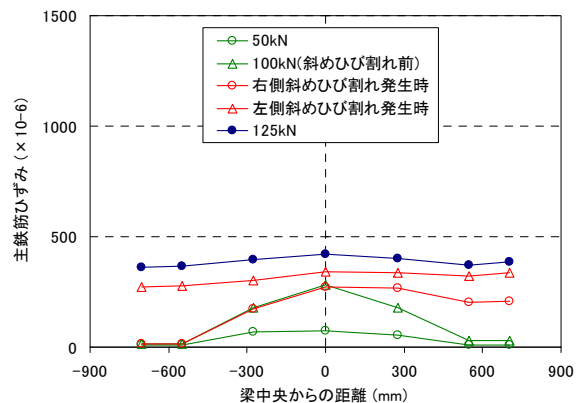


図-7 主鉄筋ひずみ分布 (ST13)

ターラップが引張力を負担し、また、主鉄筋のひずみも抑制され、その結果として部材の剛性が大きくなっている。これらの機構については、次章で解析的にも検討する。

実験を行う前には、スターラップが定着不良を有する主鉄筋を外周から取り囲むことによって、主鉄筋のすべりを摩擦力で拘束する効果もあり得ると予想していた。

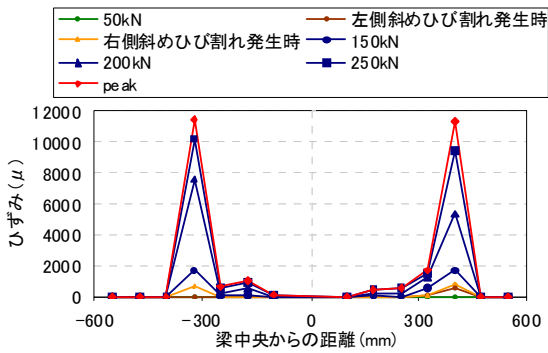


図-8 スターラップひずみ分布 (ST6)

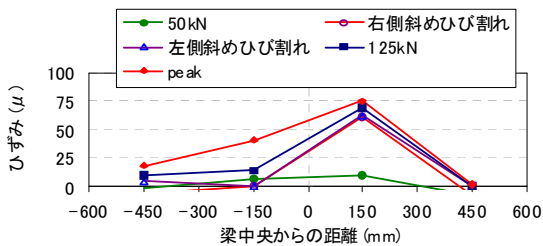


図-9 スターラップひずみ分布 (ST13)

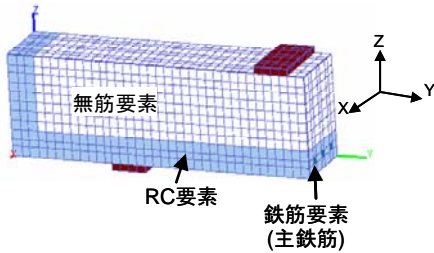


図-10 解析モデル (N)

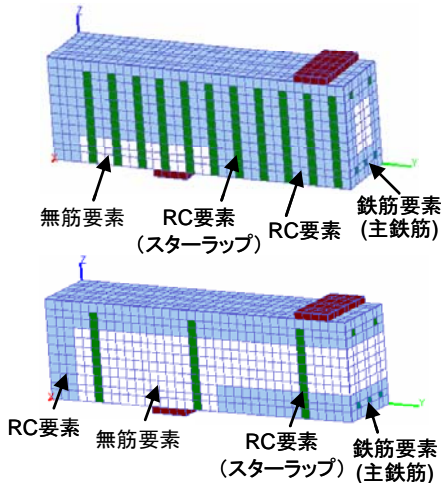


図-11 解析モデル (ST6, ST13)

しかし、斜めひび割れを横切らなかった ST13 のケースでそのような効果が確認されていないので、今回の実験ではスターラップが摩擦によりすべりを拘束する効果は見られなかった。

4 有限要素法による解析

4.1 解析概要

本研究では、分散ひび割れモデルに基づく RC 構成則による FEM プログラム COM3^{6),7)}を用いた。供試体 N の解析モデルを図-10 に示す。試験体が左右対称であるために軸対称モデルとして解析した。鉄筋の付着効果が作用してひび割れ分散が期待できる RC 要素と、付着効果が作用せずひび割れが局所化する無筋要素、鉄筋単体としての挙動を示す鉄筋要素に分け、それぞれの構成則を適用させている。鉄筋単体の要素を用いたのは、実験における付着除去をモデル化する際に、鉄筋要素の周囲に接合要素を配置し、接合要素のせん断剛性を適切に設定することによって、鉄筋と周囲のコンクリートとのすべりを表現しようとしたからである。RC 要素と無筋要素に分けるゾーニングは、特にせん断ひび割れの進展に影響を及ぼす⁷⁾。

本研究では、主鉄筋を鉄筋要素で表し、付着効果の及ぶ領域を RC ゾーン (RC 要素) とした。ST6 と ST13 のスターラップのモデルを、図-11 に示す。ST6 ではスターラップが密に配置されていることを考慮し、スターラップに関する RC ゾーンの幅を、Y 方向にはスターラップの配置間隔、X 方向にはかぶりの 2 倍¹⁰⁾の範囲とした。ST13 ではスターラップが疎に配置されたことを考慮するために、スターラップを 25mm 幅の RC 要素中にあると設定し、X・Y 方向ともにスターラップを含む要素のみを RC ゾーンとした。引張軟化係数は、RC ゾーンにおいては主鉄筋、スターラップそれぞれの方向に 0.4 とし、付着の影響を考えない領域では破壊エネルギーより算出

表-3 接合要素の特性値

付着健全部		付着除去区間	
せん断剛性	開閉剛性	せん断剛性	開閉剛性
N/mm ² /mm	kN/mm ² /mm	N/mm ² /mm	kN/mm ² /mm
25	100	0	0

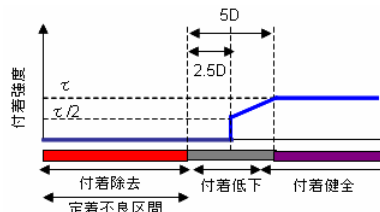


図-12 定着不良区間と付着性状

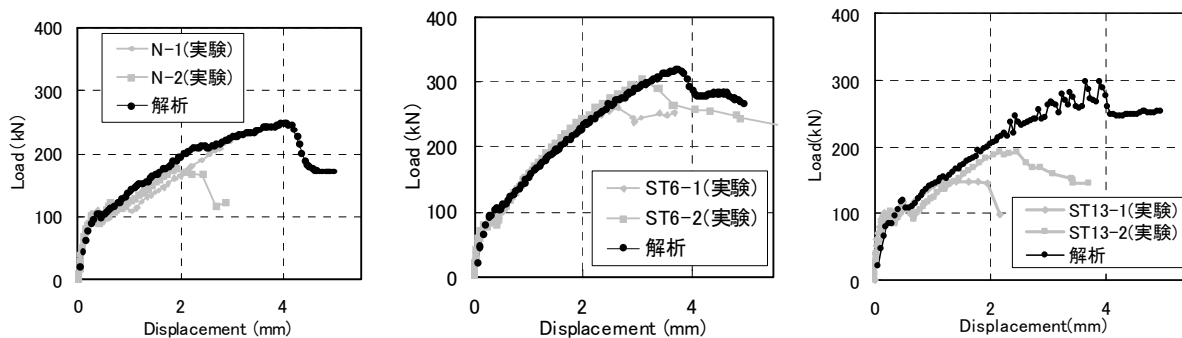


図-13 荷重変位関係（解析）

した値とした⁷⁾。

定着不良のモデル化は、鉄筋要素の周囲に接合要素を用いることによって行った。定着不良の区間と接合要素の材料特性値（せん断剛性、開閉剛性）については、岡村らの付着劣化領域⁶⁾を基にした小倉らの研究³⁾を参考にして、図-12と表-3のように設定した。

付着が健全な箇所の値は、鉄筋とコンクリート間の付着特性を検討した玉井らの一軸引張り試験⁸⁾を解析対象とし、実験結果と比較することで梁の引張部の挙動と整合性のとれる付着特性値を同定した。小倉らの研究³⁾においては接合要素を用いる際、付着が健全な箇所でせん断剛性として解析ソフトでの上限値を用い、定着不良部ではせん断剛性をゼロとしていた。この方法では、せん断剛性の上限値を使用する根拠が明確でなく、図-12のように付着低下区間を設けても、上限値が過大であればモデルにおける遷移区間の付着低下の影響が小さくなる。そのため本研究では、付着が健全な箇所のモデルに用いる接合要素のせん断剛性値を一軸引張り試験と比較しながら設定することを試みた。梁の引張主鉄筋の周囲の挙動が一軸引張り試験における挙動と似通っているためである。島らの研究⁹⁾によると、鉄筋に生じるひずみによって付着特性は変化するが、場所ごとにせん断剛性を変化させることはせず、一律の値を与えることとした。また、 $25\text{N/mm}^2/\text{mm}$ というせん断剛性の値は、鈴木らによって示された値¹¹⁾を見ても妥当な値であると考えている。

4.2 解析結果

図-13～16に解析結果を示す。図-13に荷重変位関係、図-14に主鉄筋ひずみ分布、図-15にスターラップひずみ分布、図-16に応力のコンター図を示す。

Nについては斜めひび割れ発生荷重とそれ以降の剛性低下を概ね評価できている。図-14の主鉄筋ひずみ分布をみるとひずみ分布がほぼフラットになっており、既報³⁾で示したように健全なものに比べて定着不良により定着部のすべりが大きくなり主鉄筋の応力がフックの方へ流れていることがわかる。この影響で通常のタイドアーチとは異なり、折り曲げ部間の主鉄筋全域でタイとなる

ような耐荷機構になると説明できる。その結果、フック折曲げ部に支圧力が発生し、折曲げ部と載荷点を結ぶ圧縮ストラットを形成しているようにも見える（図-16）。

ST6においては、図-13より、斜めひび割れ発生以降の剛性も含め実験の荷重変位関係を再現できた。図-14の主鉄筋ひずみ分布をみると、Nに比べ同じ荷重で比較すると主鉄筋の定着不良部におけるひずみが小さくなっており、また、分布の形状もNはフラットに近いがST6は山形になっている。これはスターラップを配置したことによる影響と考える。

梁におけるスターラップの作用としては、せん断力の負担、斜めひび割れ抑制効果によるせん断伝達の向上、拘束効果によるストラットに生じる圧縮応力の分散効果、主鉄筋のせん断抵抗の増加（ダウエル作用）などが挙げられる。図-15から斜めひび割れを横切るスターラップが荷重を負担していることが分かり、図-16のコンター図からは斜め方向の圧縮応力が分散していることが確認できる。また図-14で斜めひび割れ発生以降、同荷重レベルで定着不良部の主鉄筋のひずみが抑制されている。

NとST6では斜めひび割れ発生後の剛性が明らかに異なるが、これは上記のスターラップの作用と関連があると考えた。Nにおいては、斜めひび割れ発生後に主鉄筋の定着不良部がすべり始め斜めひび割れも拡大して定着不良のない場合のタイドアーチ機構より剛性が低下する³⁾。一方、ST6ではスターラップの補強効果により、斜めひび割れの拡大を抑え、その結果定着部のすべりが抑えられており、タイドアーチの剛性が向上したものと考えている。

ST13では、解析での最大荷重が実験値を大きく上回る結果となった。これは、図-15からもわかるように実験とは異なりスターラップがより大きな荷重を負担しているためであり、今回の解析では、斜めひび割れが載荷板付近のスターラップを迂回するような局所的な現象は再現できずスターラップを疎に配置したことの影響を解析的に示すことができなかった。解析で斜めひび割れ発生後の剛性を適切に評価できているのは、解析では載荷点

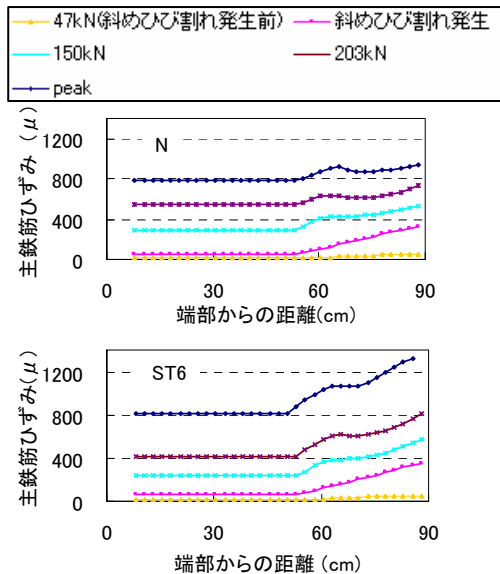


図-14 主鉄筋ひずみ分布(解析)

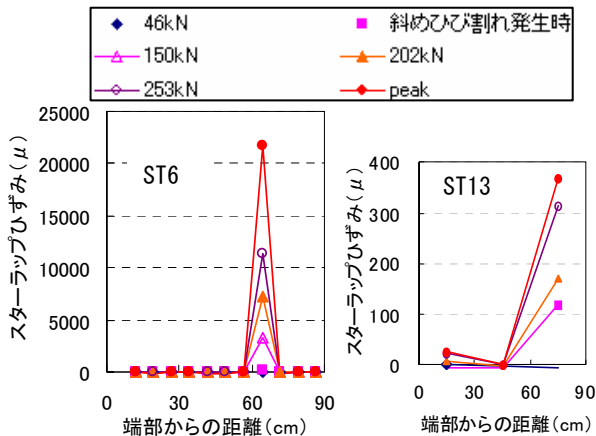


図-15 スターラップひずみ分布(解析)



図-16 最大荷重時の応力コンター図
(200kN時、Y方向)

直下のスターラップのみが荷重負担しているため、斜めひび割れを抑制する効果はほとんどなかったことによると考えている。

5 まとめ

主鉄筋に定着不良を有するディープビームにおいて、スターラップの影響を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 定着不良の梁に細径のスターラップを密に配置したものは、斜めひび割れ発生後の剛性が増加した。せん断スパン内のスターラップが引張力を負担し、斜めひび割れを抑制したため、その結果付着除去部の主鉄筋のすべりを抑えた。
- 2) 定着不良の梁に太径のスターラップを疎に配置し

たものは、斜めひび割れがせん断スパン内のスターラップを横切らず、補強効果は発揮されなかった。

- 3) 3次元FEMで、細径のスターラップが密に配置された場合について、主鉄筋に定着不良を有する梁でのスターラップの補強効果を評価することができた。

謝辞：接合要素を扱うにあたって、長岡技術科学大学の田中泰司助教にご助言を頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー124 アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005
- 2) 後藤幸正，大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第294号，pp.85-100，1980.2
- 3) 小倉弘崇，細田暁，奥野圭一：主鉄筋に定着不良を有するディープビームの耐荷性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.655-660，2007
- 4) 谷村幸裕，佐藤勉，渡辺忠明，松岡茂：スターラップを有するディープビームのせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.967-972，2001.7
- 5) 松尾真紀，Torsak Lertsrisakulrat，柳川明哲，二羽淳一郎：せん断補強筋を有するRCディープビームのせん断挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.961-966，2001
- 6) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.5
- 7) Maekawa,K., Pimanmas,A., Okamura,H.：Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003
- 8) 玉井真一，島弘，出雲淳一，岡村甫：一軸引張り試験における鉄筋の降伏以降の平均応力-平均ひずみ関係，土木学会論文集第378号/V-6，pp.239-247，1987.2
- 9) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集第378号/V-6，pp.165-174，1987.2
- 10) 土屋智史，中浜俊介，前川宏一：梁のせん断耐力と斜めひび割れの3次元分布に及ぼす側方筋の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.997-1002，2001
- 11) 鈴木暢恵，三木朋広，二羽淳一郎：鉄筋の腐食による劣化を考慮したRC部材の格子モデル解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.97-102，2005