

複合構造内の RC 部材を遮断する鋼板がその力学性状に及ぼす影響

Effect of steel plate in RC member composing hybrid structure on its mechanical behavior

井上淳*・中島章典**・斉木功***・源寛輝****・嘉無木昌之†

Jun INOUE, Akinori NAKAJIMA, Isao SAIKI, Hiroki MINAMOTO and Masayuki KAMUKI

*学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科情報制御システム科学専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

**正会員 工博 宇都宮大学大学院教授 工学研究科情報制御システム科学専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

***正会員 博(工) 宇都宮大学工学部助手 工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

****富貴沢建設コンサルタンツ (〒321-0934 宇都宮市築瀬 2-13-26)

†正会員 富貴沢建設コンサルタンツ (〒321-0934 宇都宮市築瀬 2-13-26)

In the steel-concrete hybrid structures, the reinforcing bars may pass through the steel plate and be firmly fixed to the filled concrete in the steel frame to improve the integrity of the connection between the steel and RC members. In this case, the steel plate may intercept the integrity of RC member and may disturb the continuous stress transmission between the reinforcing bar and the concrete. The purpose of this study is to investigate the influence of the inserted steel plate and the one with studs on the mechanical behavior of the axially loaded tension specimen and the bending specimen of RC beam.

Key Words : *steel-concrete rigid connection, penetrating reinforcing bar, steel plate, bonding, crack, stud*

キーワード: 鋼・コンクリート剛結部, 貫通鉄筋, 鋼板, 付着, ひび割れ, スタッド

1. はじめに

近年, 合理的な橋梁の構造形式として, 種々の鋼・コンクリート複合構造が数多く採用されてきている。その中で, 鋼上部構造と鉄筋コンクリート橋脚を剛結した複合ラーメン橋^{1)~4)}や鋼製はり鉄筋コンクリート柱を接合した T 型複合橋脚^{5), 6)}など, 鋼部材と鉄筋コンクリート部材を接合して構成された混合構造も建設されてきている。このような混合構造では, 鋼部材と鉄筋コンクリート部材接合の一体性を高めるために, 鉄筋コンクリート部材中の主鉄筋を鋼部材の下フランジに貫通させ, 鋼殻内に充填したコンクリート中に定着させる場合がある。

しかし, このような接合部形式では, 鋼板が鉄筋コンクリート部材を遮断してしまい, コンクリートと鉄筋間のスムーズな応力伝達を妨げる可能性がある。また, 鋼板とコンクリートの接触面が引張を受けた場合には, 予期しない目開きが生じる可能性もある。

そこで本研究では, 鋼・コンクリート複合ラーメン橋の RC 橋脚中の鉄筋を鋼桁下フランジに貫通させるような部分を想定し, その接合部を局所的に取り出した要素試験体を対象とし, RC 構造を遮断する鋼板が鉄筋およびコンクリートに及ぼす影響を調べた。すなわち, 鋼板を介した RC 部材である両引き試験体およびはり試験体により検討した。さらに, 鋼板とコンクリート間の目開きを抑制する方法として, 鋼板にスタッドを設け, スタッドによる目開き抑制効果, スタッドが鉄筋に及ぼす

影響, スタッドの力学性状に関しても検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

2 点載荷曲げ試験体の純曲げ区間における引張鉄筋とその周囲のコンクリートは, 長手方向の鉄筋ひずみ分布, 鉄筋とコンクリート間の付着応力伝達性状, ひび割れ発生機構という点で, 両引き試験体のそれらに類似している^{7), 8)}。特に, 両引き試験はコンクリート柱の中心に埋め込んだ鉄筋を両側から引張るという簡易的な試験であることから, RC 構造内の鉄筋とコンクリート間の付着応力伝達性状を詳細に検討するために, 度々取り上げられている⁹⁾。そこで本研究においても, はり試験体の純曲げ区間における引張鉄筋の力学性状を詳しく調べるための要素試験として両引き試験を採用し, 引き続き鋼板を介したはり試験体の検討に発展させることにした。

本研究では, コンクリートのひび割れ発生位置の鉄筋ひずみと鋼板内の鉄筋ひずみ, コンクリートのひび割れ幅と鋼板の目開き量の比較, スタッドによる種々の効果を検討するため, 図-1 の両引き試験体および図-2 のはり試験体において, 中央鋼板を介さない試験体 (NSP), 中央鋼板を介する試験体 (SP), 中央鋼板にスタッドを設けた試験体 (SSP) の 3 種類とした。

また, 本研究では, 主鉄筋のひずみ分布を詳細に調べるため, 図-3 に示すように, ひずみゲージを比較的

表-1 鋼材の試験結果

材料	用途	規格	降伏応力 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
溝切り鉄筋	主鉄筋	-	338	196
丸鋼	スタッドの脚部 (両引き)	SR295-φ9	345	200
異形鉄筋	圧縮鉄筋	SD295-D10	356	180
異形鉄筋	スターラップ	SD295-D6	329	188
スタッド	スタッド (はり)	SWRCH16A φ13×100	351	-

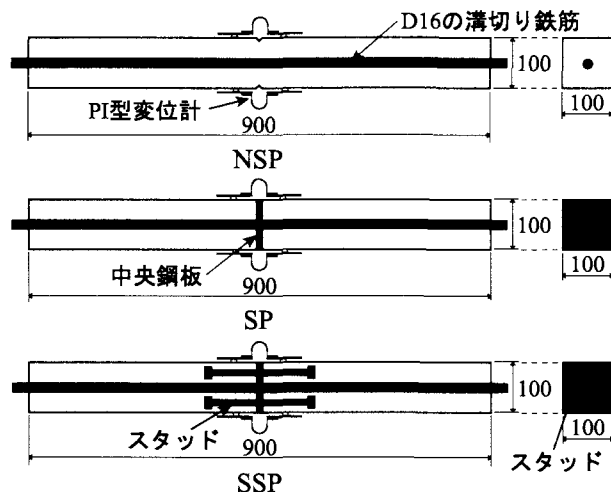


図-1 両引き試験体 (単位 mm)

細かいピッチで貼り付けることにした。このとき、一般的なひずみゲージの貼り付け方法を採用すると、ひずみゲージのコーティングが鉄筋のふしよりも大きくなってしまい、鉄筋とコンクリート間の付着に影響を及ぼすと考えられる。そこで本研究では、図-4に示すようなSD295-D16の鉄筋の肋を幅4mm、深さ3mmで切削した溝切り鉄筋¹⁰⁾を採用することにした。なお、溝はフライス盤を用いて切削し、溝を切削する際は、極力高熱を鉄筋に与えないようにするため、できるだけ低速で切削を行った。この溝切り鉄筋の機械的性質を表-1に示す。両引き試験体およびはり試験体で、別々のレディミクストコンクリートを用いて打設し、両引き試験体は材齢21日まで、はり試験体は材齢14日まで湿潤養生を行い、それ以後は乾燥養生に切り替えた。コンクリートの物性値を表-2に示す。

(1) 両引き試験体

両引き試験体の概要を図-1に示す。村田ら¹¹⁾の研究によると、鉄筋径に対するコンクリートの断面寸法を小さくした方が、ひび割れ間隔のばらつきは小さいという指摘がある。そして、試験体の長さ方向に複数のひび割れを発生させるという目的も考慮して、試験体の寸法は100mm×100mm×900mmとした。NSPの中央位置には、最初のひび割れが試験体中央に発生するように、

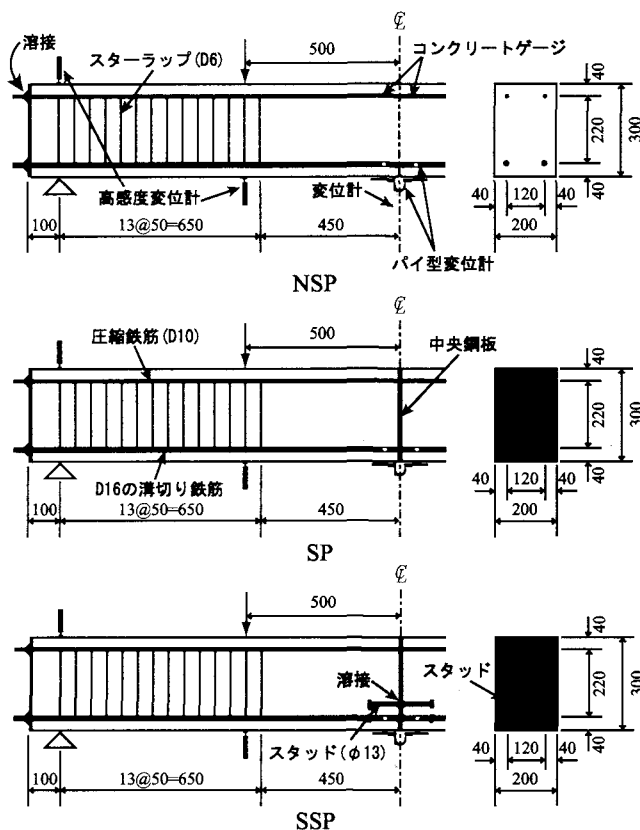


図-2 はり試験体 (単位 mm)

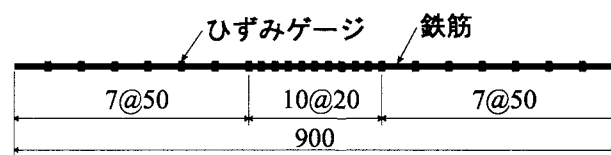


図-3 ひずみゲージの貼り付け位置 (単位 mm)

予め型枠に塩化ビニル性の三角棒を取り付けることにより、深さ5mmの切欠きを設けた。

SPの中央鋼板は幅12mmとし、主鉄筋を貫通させるため、直径18mmの穴を設けている。SSPのスタッドに関しては、本研究の試験体の断面寸法に適切な規格のスタッドが存在しないため、スタッドの頭部には平鋼(厚さ12mm、幅20mm)を加工したもの、脚部には丸

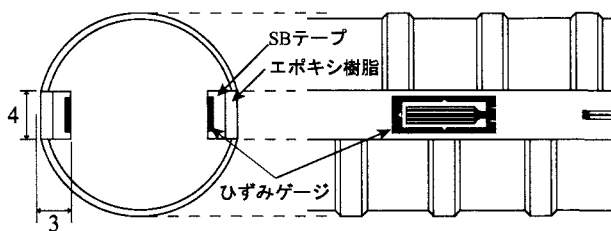


図-4 溝切り鉄筋 (単位 mm)

表-2 コンクリートの試験結果

試験	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
両引き	32.2	2.90	29.9
はり	37.5	3.40	27.5

鋼(φ9)を用いて、脚長 100mm のスタッドの性能に似せることにした。スタッドは、図-1 に示すように、鉄筋の周りに片側 4 本ずつ設けた。このとき、スタッドの脚部の径および本数は、鉄筋より先にスタッドが降伏しないこと、試験体が偏心しないこと、試験体の施工性を考慮して決定した。丸鋼は中央鋼板を貫通させてから互いを溶接で固定し、その後、平鋼を丸鋼の両端に溶接した。なお、スタッドの軸力を知るため、スタッド中央高さにひずみゲージを 2 枚ずつ貼り付けた。

(2) はり試験体

はり試験体の概要を図-2 に示す。はり試験体の寸法は、曲げ破壊が先行するように設計し、試験体の全長は 2400mm、支点間距離は 2200mm、せん断スパンは 600mm、スターラップをせん断スパン区間に 50mm ピッチで配置した。

はり試験体の引張鉄筋には、両引き試験体の鉄筋と全く同じもの(D16 の溝切り鉄筋)を、圧縮鉄筋およびスターラップにはそれぞれ D10 および D6 の異形鉄筋を用いた。これらの鉄筋の機械的性質を表-1 に示す。引張鉄筋のひずみゲージの貼り付け位置は、純曲げ区間に、両引き試験体の主鉄筋と同様に、中央 200mm 区間を 20mm ピッチで、その区間より外側は 50mm ピッチで配置した(図-3)。圧縮鉄筋のひずみゲージは中央にのみ貼り付けたが、このひずみゲージの貼り付け方法は、圧縮鉄筋中央のリブを最小限に削り落とし、できるだけ鉄筋とコンクリート間の付着に影響を及ぼさないように、ひずみゲージのコーティングを小さくした。なお、引張および圧縮鉄筋は溶接により定着プレートに固定した。

NSP 試験体中央位置には、両引き試験体と同様に、試験体中央位置にひび割れが発生するように、試験体中央位置の下縁に、深さ 5mm の切欠きを設けた。SP および SSP の中央鋼板は、両引き試験体の鋼板と同じ厚

表-3 荷重サイクルと計測ステップ

荷重サイクル (kN)	計測ステップ (kN)
0 → 10 → 0.1	2
0.1 → 30 → 0.1	2
0.1 → 60 → 0.1	4
0.1 → 90	4
90 → 0.1	8
0.1 → 終局まで	4

さ(12mm)のものとし、引張および圧縮鉄筋が貫通できるように、所定の位置に、圧縮鉄筋用に直径 15mm、引張鉄筋用に直径 18mm の穴を設けている。SSP のスタッドは径 13mm、高さ 100mm とし、引張鉄筋の周りに片側 4 本ずつ設けた(図-2)。このとき、はり試験体のスタッドの径および本数は、両引き試験体と同様に、引張鉄筋より先にスタッドが降伏しないように決定した。なお、両引き試験体のスタッドと同様に、スタッド中央高さにひずみゲージを 2 枚ずつを貼り付けた。

2.2 試験方法

(1) 両引き試験

両引き試験体の荷重荷重には、アムスラー万能試験機を用い、荷重速度は約 30N/s で荷重し、試験体中央の鉄筋ひずみが 5μ だけ変化すると、荷重、鉄筋ひずみ、中央ひび割れ幅を計測した。鉄筋ひずみ以外の計測項目としては、図-1 に示すように、標点距離 100mm のパイ型変位計を用いて、NSP では中央ひび割れ幅、SP と SSP では中央鋼板と左右のコンクリート間の目開き量を計測した。

(2) はり試験

はり試験体の荷重荷重には、荷重制御の荷重フレーム試験機を用いた。試験時の荷重サイクルと計測ステップを表-3 に示す。鉄筋ひずみ以外の計測項目としては、図-2 に示すように、試験体中央、荷重点および支点の変位を計測したが、NSP の中央位置には切欠きを設けているので、中央から一方の支点側に 20mm だけ離れた位置の変位を計測した。また、パイ型変位計により、試験体中央の引張鉄筋位置における側面および底面のひび割れ幅を計測し、ひずみゲージにより、圧縮鉄筋の断面高さに相当するコンクリートのひずみも計測した。このとき、SP と SSP の中央位置には鋼板があり、中央位置のコンクリートのひずみを計測できないという理由から、全ての試験体の中央から両支点方向へ 50mm だけ離れた箇所にひずみゲージを配置し、その位置を中心として、標点距離 60mm 区間の平均したコンクリートのひずみを計測した。

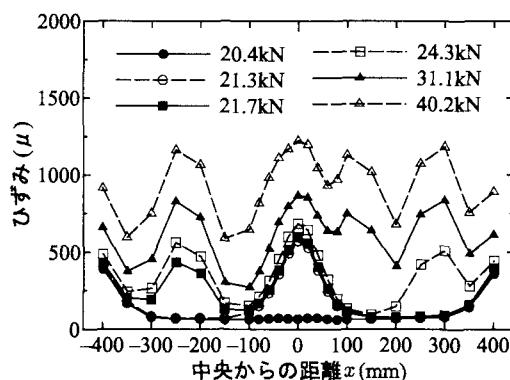


図-5-a NSP の鉄筋ひずみ分布

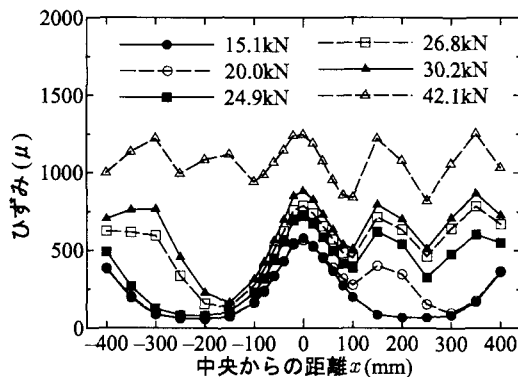


図-5-b SP の鉄筋ひずみ分布

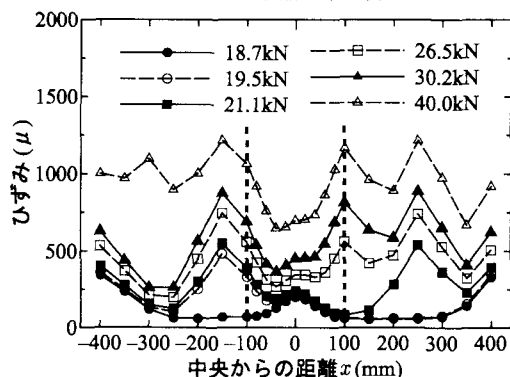


図-5-c SSP の鉄筋ひずみ分布

図-5 両引き試験体の鉄筋ひずみ分布

3. 実験結果および考察

3.1 両引き試験

NSP, SP, SSP 両引き試験において得られた長手方向の鉄筋ひずみ分布を、それぞれ図-5-a, 図-5-b, 図-5-c に示す。ここに、 $x=0$ は試験体中央位置を意味し、図-5-c には、鋼板を介して両側のスタッド頭部先端の位置を点線で示した。一般に、ひび割れが発生すると、その位置のコンクリートの引張負担応力はなくなるので、鉄筋ひずみは急激に大きくなる。図-5-c に示す SSP において、荷重が 19.5kN のとき、一側(左側)のスタッド頭部付近、荷重が 26.5kN のとき、+側(右側)のスタッド頭部付近の鉄筋ひずみが急激に大きくなっており、この位置にひび割れが発生したことが分かる。

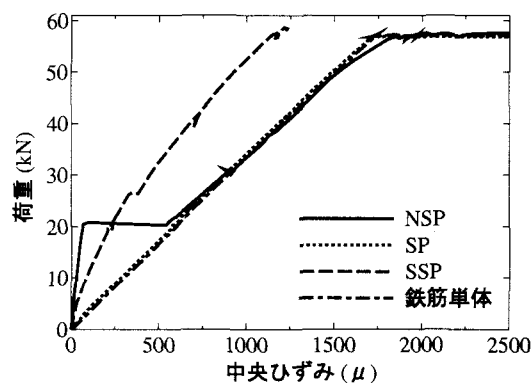


図-6 荷重 - 中央ひずみ関係

図-5-b に示す SP の鉄筋ひずみ分布から、その分布形状は中央位置 ($x=0$) を頂点とした凸な形状をしていることから、SP は始めから中央位置にひび割れが発生している RC 部材に類似していると言える。SSP では、鋼板を介して両側のスタッド頭部間の鉄筋ひずみ分布に着目すると、同区間における NSP および SP の鉄筋ひずみに比べて、SSP の鉄筋ひずみは小さいので、スタッドの軸力負担により、鉄筋ひずみは抑制されたと言える。両側のスタッド頭部付近にひび割れが発生し、スタッドの軸力負担が減少すると予想される 26.5kN 以降も、スタッド頭部区間の SSP の鉄筋ひずみは、同区間における NSP および SP の鉄筋ひずみに比べて小さいことが分かる。これは、中央鋼板を介して両側のスタッド頭部間の鉄筋、コンクリートおよび中央鋼板間の一体性が高く、各々の部材が協力して、引張荷重に抵抗したからと考えられる。このとき、鉄筋とスタッド間の応力伝達は、鉄筋からコンクリート、継いでコンクリートからスタッド頭部へと、集中的に起こると予想される。このような応力伝達が互いに行われ、スタッド頭部付近にひび割れが発生したとすれば、そのひび割れ位置の鉄筋に応力が集中すると考えられる。しかし、図-5-c から、スタッド頭部付近のひび割れ位置の鉄筋ひずみは同じ試験体の他の位置、あるいは他の試験体 (NSP, SP) のひび割れ発生位置の鉄筋ひずみと大きな差異はないと言える。

次に、荷重 - 鉄筋の中央ひずみ関係を図-6 に示す。ここで、図-6 には、溝切り鉄筋単体の引張試験結果も併記した。図-6 から、SP の中央ひずみは載荷荷重によらず、鉄筋単体のひずみにほぼ等しく、中央ひび割れ発生後の NSP の中央ひずみにもほぼ等しいということが分かる。これに対して、SSP の中央ひずみは、中央ひび割れ発生後の NSP および SP の中央ひずみに比べて小さい。従って、スタッドの軸力負担によって、中央鋼板内の鉄筋ひずみは、中央ひび割れ発生後の NSP および SP の中央ひずみに比べて、抑制されたと言える。また、SSP では、荷重 26.5kN を境にして、荷重 - 中央ひずみ関係の曲線の傾きが小さくなっている。つまり、

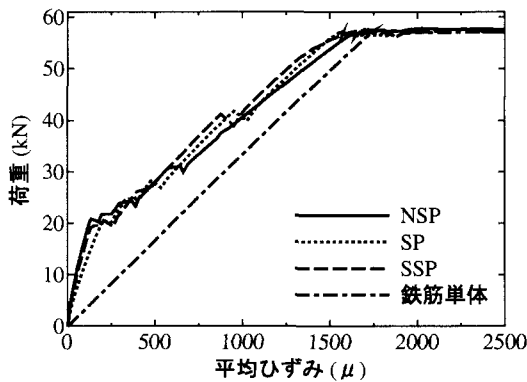


図-7 試験体全体の鉄筋の平均ひずみ

荷重 26.5kN を境にして、荷重に対する中央ひずみの増加量が大きくなったことを意味している。この原因は、図-5-c から、荷重 26.5kN のときに、中央鋼板を介して両側のスタッド頭部付近にひび割れが発生したことになり、それにより、両側のスタッド頭部間のコンクリートの引張力負担が減少し、鉄筋による引張力負担が増加したからと考えられる。

試験体全体の荷重 - 鉄筋の平均ひずみ関係を図-7 に示す。ここで、鉄筋の平均ひずみは、ひずみゲージの貼り付け位置 (ピッチ間隔) に応じて、計測した鉄筋ひずみのデータに重みを付けることにより算定した。つまり、計測した各々の鉄筋ひずみがそれより内側のひずみゲージまでの区間を代表する鉄筋ひずみと見なし、得られる階段状の鉄筋ひずみ分布を積分し、それを試験体の長さで除することにより鉄筋の平均ひずみを算出した。なお、試験体の中央位置で計測した鉄筋ひずみに関しては、NSP 試験体では対応する長さを 5mm, SP および SSP 試験体では、中央鋼板の厚さを考慮して、対応する長さを 12mm とした。図-7 から、荷重の大きさによらず、全シリーズの鉄筋の平均ひずみの挙動はほぼ等しいことが分かる。また、鉄筋が降伏するまで、全シリーズの鉄筋の平均ひずみは鉄筋単体より小さいので、コンクリートによる引張軸力負担、すなわち、テンションスティフニング効果が全シリーズの試験体に働いていることが分かる。

荷重 - 中央ひび割れ幅関係を図-8 に示す。ここで、SP および SSP の中央ひび割れ幅は中央鋼板と左右のコンクリート間の目開き量の和を意味する。図-8 から、SP の中央ひび割れ幅の増加量は、中央ひび割れ発生後における NSP の中央ひび割れ幅の増加量にほぼ等しいことが分かる。SSP に関しては、スタッド頭部の抵抗により、SP と比べて中央鋼板とコンクリート間の目開きが抑制されていることが分かる。

荷重 - スタッドの負担軸力関係を図-9 に示すが、スタッドの負担軸力はスタッド中央高さのひずみ、丸鋼 ($\phi 9\text{mm}$) の断面積および弾性係数から算定した。図-9 にある Stud(+側) および Stud(-側) とは、図-5-c の

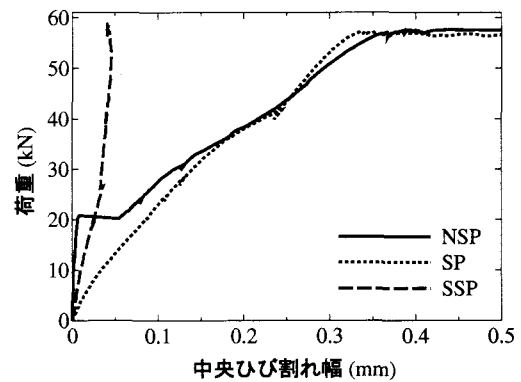


図-8 荷重 - 中央ひび割れ幅関係

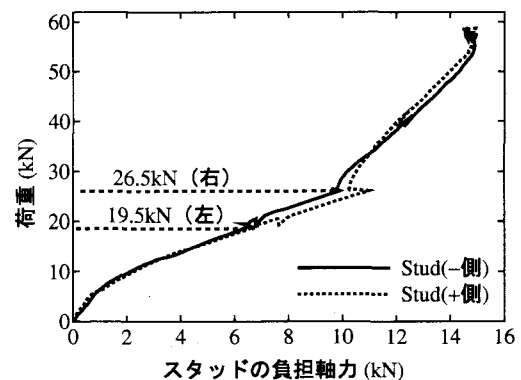


図-9 荷重 - スタッドの負担軸力関係 (両引き試験)

+ 側 (右側) および - 側 (左側) のスタッドの負担軸力を意味し、それぞれ片側 4 本分の軸力の和を表している。また、同図には、スタッドの頭部付近にひび割れが発生したときの荷重を示した。この図から、荷重 26.5kN を境にして、荷重 - スタッドの負担軸力関係を表す曲線の傾きが大きくなっていることが分かる。つまり、荷重 26.5kN を境にして、荷重に対するスタッドの負担軸力の増加量が小さくなったことを意味している。この原因は、上述したように、中央鋼板を介して両側のスタッド頭部付近にひび割れが発生することによって、コンクリートからスタッド頭部に伝達される引張力が減少したからと考えられる。

3.2 はり試験

本研究のはり試験では、表-3 のような荷重ステップで載荷したので、除荷および再載荷のデータが存在する。しかし、全体的な挙動の把握を重視して、以下には、除荷および再載荷のデータを除外した結果を示す。

NSP, SP, SSP の引張側の鉄筋ひずみ分布をそれぞれ図-10-a, 図-10-b, 図-10-c に示す。なお、 $x=0$ は試験体中央位置を表し、図-10-c には、両引き試験体 SSP の鉄筋ひずみ分布と同様に、鋼板を介して両側のスタッド頭部先端の位置を点線で示した。上述したように、鉄筋ひずみ分布の凸な形状付近のコンクリートには、ひび割れが発生している。図-10-b から、荷重

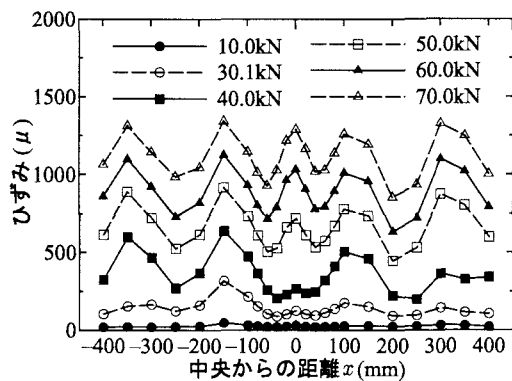


図-10-a NSP の鉄筋ひずみ分布

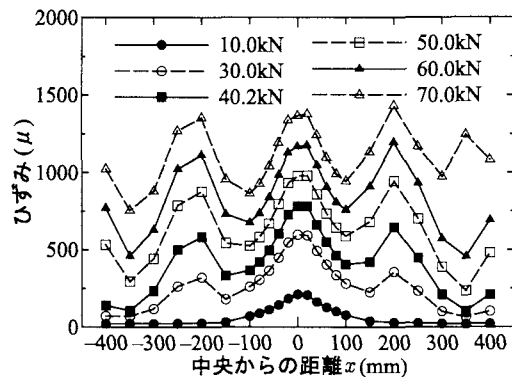


図-10-b SP の鉄筋ひずみ分布

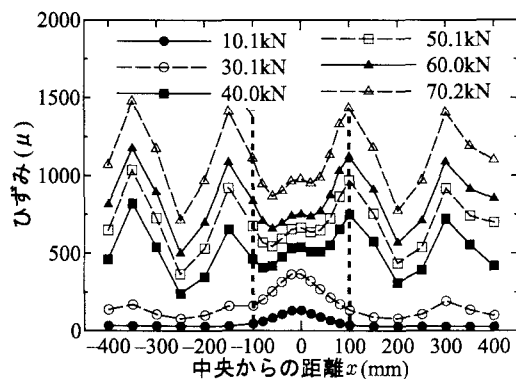


図-10-c SSP の鉄筋ひずみ分布

図-10 はり試験体の鉄筋ひずみ分布

70kN までの SP の中央鋼板内 ($x=0$) の鉄筋ひずみは、同試験体における他のひび割れ発生位置の鉄筋ひずみにほぼ等しいことが分かる。つまり、荷重 70kN までは、曲げを受けた場合においても、中央鋼板内の鉄筋には、応力が集中していないと言える。また、はり試験体 SP の鉄筋ひずみ分布は中央位置を頂点とした凸な形状をしていることから、両引き試験体の SP と同様に、始めから中央位置にひび割れが発生している RC 部材に類似していると言える。図-10-c から、スタッドの軸力負担により、鋼板を介して両側のスタッド頭部間の鉄筋ひずみは、同区間における中央ひび割れ発生後の NSP および SP の鉄筋ひずみに比べて小さく、抑制されていることが分かる。このスタッドによる鉄筋ひずみの抑制効

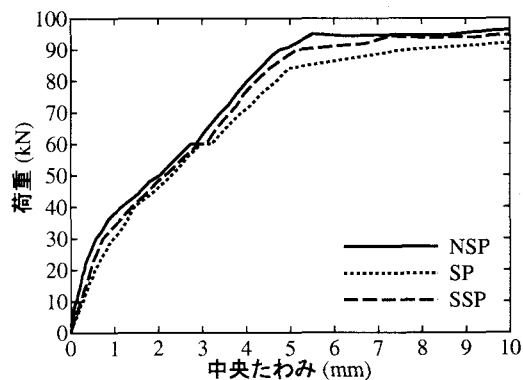


図-11 荷重 - 中央たわみ関係

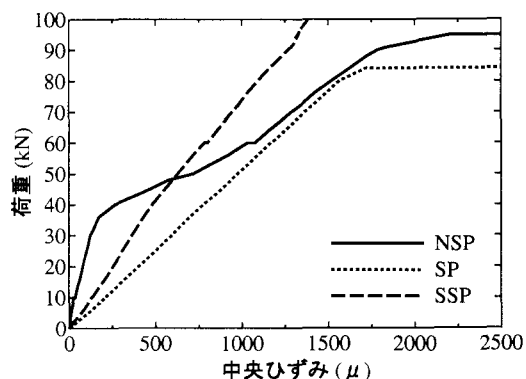


図-12 荷重 - 中央ひずみ関係 (引張鉄筋)

果は、鋼板を介して両側のスタッド頭部付近にひび割れが発生した後も継続しているが、これは、両引き試験の SSP と同様に、荷重の大きさによらず、スタッド頭部間の鉄筋、コンクリートおよび中央鋼板間の一体性が高いからと考えられる。このとき、スタッド頭部付近のひび割れ発生位置における鉄筋への応力集中が予想されるが、他のひび割れ発生位置の鉄筋ひずみと大きな差異はないと言える。

荷重 - 中央たわみ関係を図-11 に示す。この図から、同じ荷重では、SP の中央たわみが一番大きく、次いで、SSP、NSP の順であることが分かる。つまり、中央鋼板に設けたスタッドの存在により、SSP の中央たわみは SP より小さく、SSP の曲げ剛性は SP より大きくなったと言える。また、どのシリーズの試験体においても、荷重が 30kN を過ぎると、中央たわみの増加量が大きくなっているが、この原因は、ひび割れが発生し、純曲げ区間の曲げ剛性が小さくなったからと考えられる。

引張鉄筋の荷重 - 中央ひずみ関係を図-12 に示す。両引き試験では、中央ひび割れ発生後の NSP の中央鉄筋ひずみは直に SP とほぼ等しい値となった。しかし、両引き試験とは違って、はり試験では、図-12 に示すように、中央ひび割れ発生後の NSP は SP に徐々に近づく傾向を示す。この理由は、両引き試験では、全断面が引張を受けるのに対し、はり試験では、全断面が同時に引

表-4 引張鉄筋の降伏の順番とその位置

降伏順序	NSP(mm)	SP(mm)	SSP(mm)
1	300	0	100
2	0	200	-350
3	-150	-200	300
4	-350	-	-150
5	100	-	-

張を受ける訳ではないからと考えられる。また、両引き試験では、ひび割れが発生した直後に、その位置の鉄筋に軸力が集中し、中央ひび割れ発生直後のNSPとSPの鉄筋ひずみがほぼ等しくなる。これに対して、はり試験では、ひび割れが発生しても、純曲げ区間における曲げモーメントはほぼ一様であるため、NSPにおいて、中央ひび割れ発生直後のその位置の主鉄筋に引張力が集中しないからと考えられる。

ここで、試験体中央位置における引張鉄筋の降伏を、鉄筋単体の引張強度試験結果から得られた降伏ひずみ 1720μ から判断すると、降伏荷重はそれぞれ、NSPが約88kNで、SPが約84kNである。また、鉄筋の降伏後に荷重が一定となったとき、すなわち鉄筋のひずみが約 2250μ に達したときの荷重を考えると、SPよりNSPの方が約10kN大きい。つまり、SPの中央鋼板内の鉄筋はNSPの中央ひび割れ位置の鉄筋より小さい荷重段階で降伏に至ると言え、鉄筋の降伏過程において、NSPは徐々に鉄筋の塑性化に移行するのに対し、SPは急激に塑性化に至っていることが分かる。この相違は、引張鉄筋の降伏の順番の影響によるものと考えられる。詳しく説明すると、引張鉄筋の降伏はひび割れ発生位置のみで生じ、複数のひび割れ発生位置で、鉄筋の降伏が同時に起こる訳ではないからである。すなわち、あるひび割れ位置の鉄筋が降伏し、そのひずみが $5000 \sim 10000\mu$ に達すると、別のひび割れ位置の鉄筋が降伏するというサイクルがランダムに起こると考えられる。

そこで、純曲げ区間の引張鉄筋の降伏位置の順序を調べることにし、その結果を表-4に示す。この表から、鉄筋の最初の降伏は、NSPでは $x=300\text{mm}$ 、SPでは $x=0\text{mm}$ 、SSPでは $x=100\text{mm}$ の位置で生じている。これら最初に降伏した3つの位置の鉄筋ひずみと荷重の関係を図-13に示す。図-12の鉄筋ひずみ 2250μ 時におけるNSPとSPの荷重の差より、図-13の鉄筋降伏後におけるNSPとSPの差が約5kN小さくなっている。従って、降伏の順番が早いほど、低い荷重段階で、鉄筋に塑性化が集中すると言える。しかし、NSP試験体とSP試験体との間で、 2250μ 時における荷重には、まだ約5kNの差がある。この理由は、1つ目として、圧縮側のコンクリートの有無、すなわち、NSP試験体

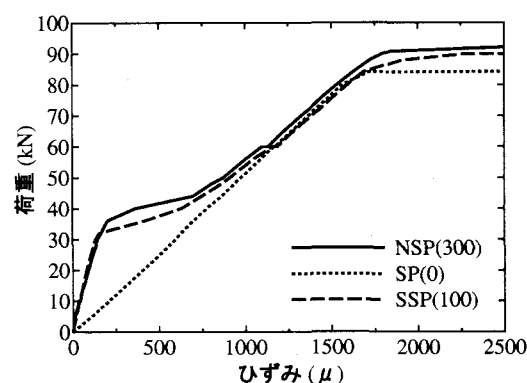


図-13 荷重-最初にひび割れが発生した位置の鉄筋ひずみ関係

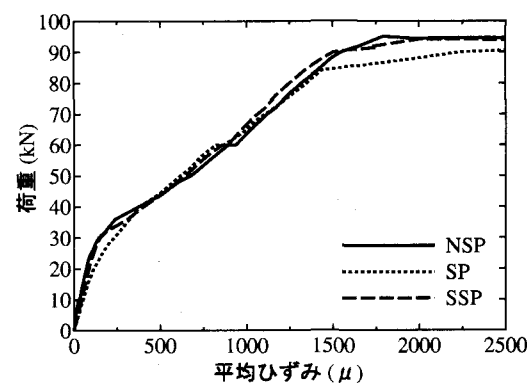


図-14 載荷点区間の鉄筋の平均ひずみ

とSP試験体の圧縮側における応力伝達の相違による影響と考えられる。2つ目として、引張鉄筋のひずみゲージ貼り付け位置とひび割れ位置のずれによる影響も考えられる。つまり、着目したひずみゲージの値はひび割れ位置の厳密な鉄筋ひずみを示していないということである。3つ目として、はり試験では、ひび割れが発生しても、純曲げ区間における曲げモーメントはほぼ一様であるため、NSPにおいて、中央ひび割れ発生直後のその位置の主鉄筋に引張力が集中しないからと考えられる。このように、様々な影響が重なり合うことによって、NSP試験体とSP試験体との間で、 2250μ 時における荷重に差が生じたと考えられる。

SSPの中央ひずみは、図-12から、中央ひび割れ発生後(約50kN以降)のNSPおよびSPに比べて小さく、スタッドの軸力負担により、ひずみは抑制されていることが分かる。

純曲げ区間の鉄筋の平均ひずみを図-14に示す。引張鉄筋に関して、全シリーズを局所的に比較した場合、中央ひび割れ発生前のNSP、SPおよびSSPの間には大きな差があった。純曲げ区間の鉄筋の平均ひずみで考えた場合、図-14から、鉄筋降伏までは、全シリーズの鉄筋の平均ひずみはほぼ等しいことが分かる。しかし、鉄筋の降伏時においては、NSPとSSPの降伏荷重はほぼ等しいが、SPの鉄筋の降伏荷重は、中央鋼板内の鉄筋

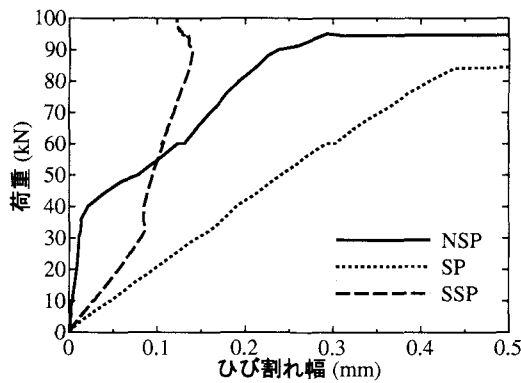


図-15-a 荷重 - 中央ひび割れ幅関係 (底面)

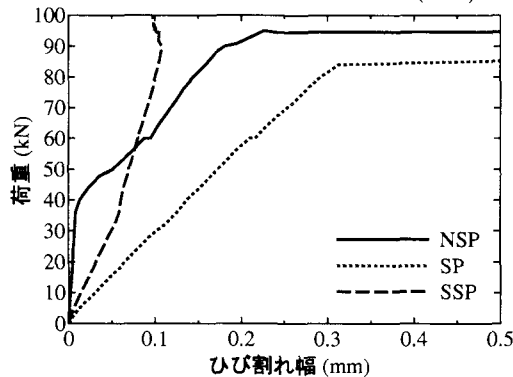


図-15-b 荷重 - 中央ひび割れ幅関係 (側面)

図-15 荷重 - 中央ひび割れ幅関係

に塑性化が集中するため、NSPおよびSSPに比べて小さいことが分かる。従って、純曲げ区間全体で鉄筋の引張挙動を検討した場合、鉄筋の降伏前までは、中央鋼板の有無およびスタッドの有無に関わらず、鉄筋の平均ひずみに大差はないと言える。また、鉄筋の降伏時における中央鋼板内の鉄筋への塑性化の集中はスタッドにより防げると言える。

中央位置における荷重 - ひび割れ幅関係を図-15-a (底面) および図-15-b (側面) に示す。ここで、SPおよびSSPの中央ひび割れ幅は中央鋼板と左右のコンクリート間の目開き量の和を表している。両引き試験では、中央ひび割れ発生後のNSPはSPの中央ひび割れ幅にほぼ等しくなったが、図-15-aおよび図-15-bから、はり試験での中央ひび割れ発生後のNSP中央ひび割れ幅はSPのそれに近づいていない。この理由は、はり試験の荷重と中央ひずみ関係の考察で述べたように、はり試験は両引き試験と違って、ひび割れ発生位置に引張力が集中しないからと考えられる。ただし、両引き試験体と同様に、NSPとSPの中央ひび割れ幅の増加量はほぼ等しいと言える。また、図-15-aおよび図-15-bから、鉄筋降伏時の荷重は、NSPとSPの間に差があるが、この原因は、上述したように、引張鉄筋の降伏の順番などの影響により、NSPおよびSSPに比べて、低い荷重段階で、SPの試験体中央位置に塑性化が集中した

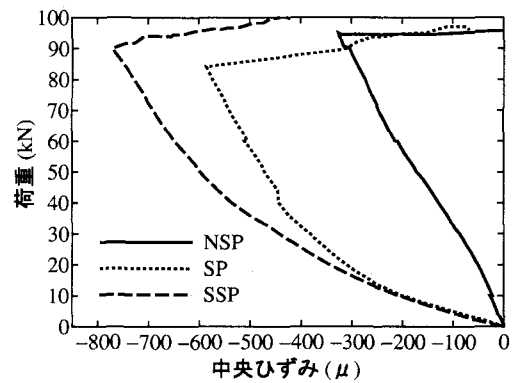


図-16 荷重 - 中央ひずみ関係 (圧縮鉄筋)

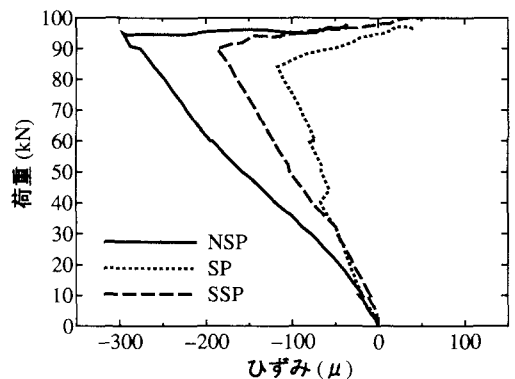


図-17 荷重 - コンクリートひずみ関係

からと考えられる。なお、SSPはスタッドの目開き抑制効果により、SPと比べて中央鋼板とコンクリート間の目開きが抑制されていることが分かる。

次に、圧縮鉄筋の荷重 - 中央ひずみ関係を図-16に示す。図-16から、荷重が約40kNになるまで、NSPに比べて、SPとSSPの圧縮鉄筋のひずみの増加量は著しく大きい。この理由は、荷重が約40kNになるまで、圧縮側の中央鋼板とコンクリート間の支圧力伝達が不十分なために、中央鋼板付近におけるコンクリートの圧縮負担が十分に働かず、その分が圧縮鉄筋の負担として表れたからと考えられる。荷重が40kNより大きくなると、中央鋼板とコンクリート間の支圧力伝達が十分に働き始め、結果的にコンクリートの圧縮負担がNSPの場合と同程度になり、全シリーズの圧縮鉄筋のひずみの増加量はほぼ等しくなったと考えられる。

図-17に、中央鋼板近くの圧縮鉄筋の断面高さに相当する位置のコンクリートのひずみを示す。図-2に示すように、各試験体の両側面に4枚のコンクリート用ひずみゲージを取り付けたので、4つのデータが得られるが、その4つのデータはほぼ等しかったので、それぞれのシリーズで得られたコンクリートのひずみ4つを平均したものを示す。図-17から、荷重の大きさによらず、NSPにおけるコンクリートのひずみの増加量はSPおよびSSPよりも大きいことが分かる。つまり、中央鋼板付近のSPおよびSSPの圧縮側のコンクリートは、

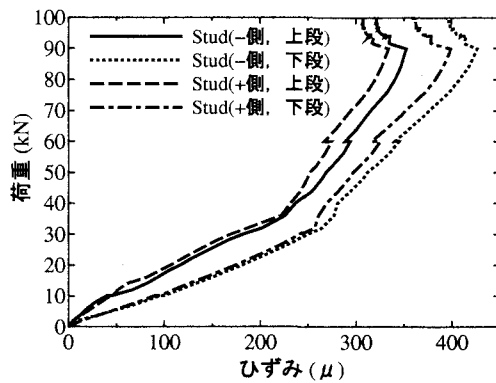


図-18 荷重 - スタッドのひずみ関係

NSP に比べて負担力が小さいと言える。これらコンクリートの圧縮挙動は、上述した圧縮鉄筋の挙動に対応した結果となっていることが分かる。

以上のように、支圧力が小さい段階では、鋼板とコンクリート間の支圧力伝達が不十分な場合も予想されるので、この影響が無視できない場合には、設計に考慮する必要があると考えられる。

荷重 - スタッドのひずみ関係を図-18 に示す。図中の Stud(一側, 上段) とは、中央鋼板より左側、すなわち一側の上段に設けたスタッド 2 本のひずみの平均値である。同様に、Stud(一側, 下段) は一側の下段に設けたスタッド 2 本のひずみの平均値を表し、Stud(+側, 上段)、Stud(+側, 下段) も同様である。図-18 から、両引き試験体のスタッドと同様に、鋼板を介して両側のスタッド頭部付近にひび割れが発生すると、荷重に対するスタッドのひずみの増加量、すなわち、スタッドの軸力負担が減少していることが分かる。

4. まとめ

本研究では、RC 部材を遮断する鋼板が鉄筋およびコンクリートの挙動に及ぼす影響を、両引き試験およびはり試験により検討した。また、鋼板とコンクリート間の目開きを抑制のために、鋼板に設けたスタッドの挙動も検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

両引き試験について

1. 中央鋼板を有する試験体の中央鋼板内の鉄筋ひずみは、鉄筋単体のひずみにほぼ等しく、また、中央鋼板のない試験体におけるひび割れ発生後のその位置の鉄筋ひずみにほぼ等しい。さらに、荷重に対する中央鋼板と左右のコンクリート間の目開きの増加量は、中央鋼板のない試験体の中央ひび割れ幅の増加量にほぼ等しい。
2. 中央鋼板の有無、スタッドの有無に関わらず、両引き試験体全体の鉄筋の平均ひずみはほぼ等しい。
3. 中央鋼板にスタッドを設けた場合、スタッドの軸力負担により、中央鋼板内の鉄筋ひずみは抑制され

る。しかし、中央鋼板を介して両側のスタッド頭部に、ひび割れが発生すると、スタッドによる軸力負担は減少し、中央鋼板内の鉄筋ひずみの増加量は大きくなる。また、スタッド頭部の抵抗により、中央鋼板と左右のコンクリート間の目開き量は抑制される。

はり試験について

1. 引張鉄筋の降伏時に、中央鋼板内の鉄筋には、塑性化が集中する可能性がある。ただし、中央鋼板にスタッドを設けることにより、中央鋼板内の鉄筋への塑性化の集中は緩和できる。
2. 中央鋼板の有無、スタッドの有無に関わらず、引張鉄筋の降伏前までは、純曲げ区間の鉄筋の平均ひずみはほぼ等しい。
3. 荷重に対する中央鋼板と左右のコンクリート間の目開きの増加量は、中央鋼板のない試験体の中央ひび割れ幅の増加量にほぼ等しい。
4. 中央鋼板にスタッドを設けた場合、スタッドの軸力負担により、中央鋼板内の鉄筋ひずみは抑制される。しかし、中央鋼板を介して両側のスタッド頭部にひび割れが発生すると、スタッドの軸力負担は減少する。また、スタッド頭部の抵抗により、中央鋼板と左右のコンクリート間の目開き量は抑制される。
5. 中央鋼板がある場合、初期の荷重段階では、中央鋼板とコンクリート間の不十分な支圧力伝達により、中央鋼板付近におけるコンクリートの圧縮負担が十分に働かず、その分が圧縮鉄筋の負担として表れると考えられる。

参考文献

- 1) 佐藤徹，清水功雄，大田貞次，町田篤彦：複合ラーメン橋の接合部設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1431-1438，1999.3.
- 2) 清水功雄，鳥越弘行：鋼桁と RC 橋脚の剛結構造に関する研究 (第 1 報)，宮地技報，No.10，pp.106-111，1994.
- 3) 清水功雄，鳥越弘行：鋼桁と RC 橋脚の剛結構造に関する研究 (第 2 報)，宮地技報，No.11，pp.37-44，1995.
- 4) 佐藤孝英，大島俊之，三上修一，山崎智之，井上稔康：鋼桁と RC 柱を半剛結した構造の接合部の非線形性と応力伝達メカニズムの解析，応用力学論文集，Vol.3，pp.415-426，2000.8.
- 5) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計，pp.149-150，1999.4.
- 6) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて，pp.354-386，1997.9.
- 7) 岡村甫，前田詔一：鉄筋コンクリート工学，市ヶ谷出版社，pp.98-102，2001.2.
- 8) 日本鋼構造協会：合理化桁に関するデザインマニュアル，pp.29-32，2000.3.

- 9) 三村陽一，吉武勇，辻和秀，田中浩，浜田純夫：両引き試験による若材齢コンクリートと異形鉄筋の付着特性の評価，土木学会論文集， No.732/V-59， pp.211-223， 2003.5.
- 10) 佐藤良一，氏家勲，鈴木雅博，北条泰秀：鉄筋コンクリート曲げ部材の長期変形挙動およびその解析法に関する研究，土木学会論文集， No.634/V-45， pp.27-41， 1999.11.
- 11) 村田二郎，河合紘茲：両引き試験による鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究，土木学会論文集， No.378/V-6， pp.107-115， 1987.2.

(2004 年 9 月 17 日 受付)