

(30) 鋼・コンクリート接触面の支圧・摩擦に関する基礎的検討

An experimental study on bearing and friction between steel and concrete

中島章典*, 本田紘美**, 藤澤知樹***, 斉木功****, 大江浩一†

Akinori Nakajima, Hiromi Honda, Tomoki Fujisawa, Isao Saiki and Hirokazu Ooe

*正会員 工博 宇都宮大学教授 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)

**郡山市 (〒963-8601 郡山市朝日 1-23-7)

***株式会社カンドー (〒160-0014 東京都新宿区内藤町 1)

****正会員 博(工) 宇都宮大学助手 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)

†トビー工業株式会社 鹿沼工場製作管理チーム (〒322-0014 鹿沼市さつき町 13-1)

In this study, a bonding property of the contact surface between concrete and steel is investigated paying attention to the applied bearing force, its surface condition and a mechanical bond such as a shear connector. The specimen employed in the experiment is composed of the steel plate in the concrete blocks and is regarded as a part of the element of the steel-concrete hybrid structures. The relation between the relative slip and the shearing force, which is produced by friction and/or the mechanical action, and the relation between the maximum shear force and the bearing force applied on the contact surface are investigated through the experiment. Consequently, it is clear that the maximum shear force is linearly proportional to the bearing force applied on the contact surface irrespective of the contact surface condition.

Key Words : steel-concrete hybrid structure, bonding, bearing, friction, stud, experiment

1. はじめに

鋼・コンクリート複合構造として最も基本的な構造である合成桁橋をはじめとして、合成床版、合成柱など種々の複合構造が盛んに利用されている。さらに、鋼・コンクリート複合ラーメン橋や鋼・コンクリート混合桁橋などの複雑な複合構造も建設されてきている。これらの複合構造では、鋼部分(部材)からコンクリート部分(部材)あるいは逆に応力が適切に伝達される必要がある。したがって、これらの鋼・コンクリート複合構造の力学性状をより合理的に把握するためには、まず、その接触面での応力伝達性状を把握する必要があると言える。

このような背景から、本稿では、鋼とコンクリートとの接触面での付着作用(ここでは、接触面に平行な応力伝達を対象)に及ぼす支圧などの影響を検討する。関連する既往の研究として、園田ら¹⁾は、引抜き方式による要素試験を行い、平鋼板あるいは縞鋼板とコンクリート面の付着特性を検討し、平鋼板とコンクリートの摩擦による最大付着強度は支圧力と線形関係にあることを示している。また、山田ら²⁾は、非合成桁橋を対象とした検討を行い、鋼フランジとコンクリート床版間のせん断伝達に及ぼす接触面の付着作用が十分大きいと述べている。

一方、最近注目されている孔あき鋼板ジベルの応力伝達機構においては、鋼板とコンクリートの付着の影

響も無視できないと考えられる。

そこで本稿では、複合構造内の鋼とコンクリートとの接触面を模擬した2タイプの要素試験体を用い、支圧力、鋼とコンクリートの接触面の付着性状および機械作用(スタッド)の有無などをパラメータとして、鋼とコンクリートの接触面の付着作用を検討した。

2. 試験体および試験方法

ここでは、以下に示すような2タイプの要素試験体を用いて、鋼とコンクリートの接触面に一定の支圧力を作用させた状態で、接触面と平行なせん断力を作用させる支圧摩擦試験を行った。そして、鋼とコンクリートの接触面の状況や支圧力の大きさを変化させて、それらが支圧摩擦試験で得られる荷重-ずれ関係や最大荷重に及ぼす影響を調べた。

2.1 内部支圧試験体

まず、図-1のように鋼板をコンクリートブロックで挟む要素試験体を用い、側面にあけた4つの穴に両端ネジ切りしたφ16mmの丸鋼棒を通し、これを締めることによって、中央の鋼板に支圧力を与えた。以下、このタイプの試験体を内部支圧試験体と呼ぶ。鋼とコンクリートの接触性状を変化させるために、鋼板にクラフトテープを貼付したものと、鋼板とコンクリートブロックを直接接合させたものの2通りを用いた。ここで、鋼板にクラフトテープを貼付したのは、鋼とコン

表-1 試験体の種類

試験体名	支圧力 N/mm ²	接触条件	スタ ッド	試験 体数
内部支圧試験体				
P00-I	0	鋼板	なし	2
P02-I	0.2	鋼板	なし	2
P05-I	0.5	鋼板	なし	2
P10-I	1.0	鋼板	なし	2
P20-I	2.0	鋼板	なし	1
CP00-I	0	クラフト	なし	2
CP02-I	0.2	クラフト	なし	2
CP05-I	0.5	クラフト	なし	2
CP10-I	1.0	クラフト	なし	2
コンクリートの圧縮強度 40.0N/mm ² 鋼板 SS400 表面処理 エッチングプライマー				
外部支圧試験体				
P00-O	0	鋼板	なし	2
P02-O	0.2	鋼板	なし	2
P05-O	0.5	鋼板	なし	2
P10-O	1.0	鋼板	なし	2
P20-O	2.0	鋼板	なし	2
TP00-O	0	テフロン	なし	2
TP02-O	0.2	テフロン	なし	
TP05-O	0.5	テフロン	なし	
TP10-O	1.0	テフロン	なし	
SP00-O	0	鋼板	あり	2
SP02-O	0.2	鋼板	あり	2
SP05-O	0.5	鋼板	あり	2
SP10-O	1.0	鋼板	あり	2
SP20-O	2.0	鋼板	あり	2
TSP00-O	0	テフロン	あり	2
コンクリートの圧縮強度 41.4N/mm ² 鋼板 SS400 表面処理 エッチングプライマー スタッド $\phi 13 \times 80$ mm 降伏応力 274N/mm ²				

クリートの摩擦の影響を低減するために一般にクラフトテープが用いられること、および鋼板とコンクリートの接触面の付着性状を変えることを意図したからである。

支圧力は0, 0.2, 0.5, 1.0N/mm²の4通りとし、クラフトテープを貼付したものと、貼付しないものを2体ずつ、また後者で支圧力2.0N/mm²のものを1体の計17体について試験を行った。これらの試験体の種類、条件などを表-1にまとめている。なお、支圧力は丸鋼棒の中央に貼付したひずみゲージを用いて計測した。

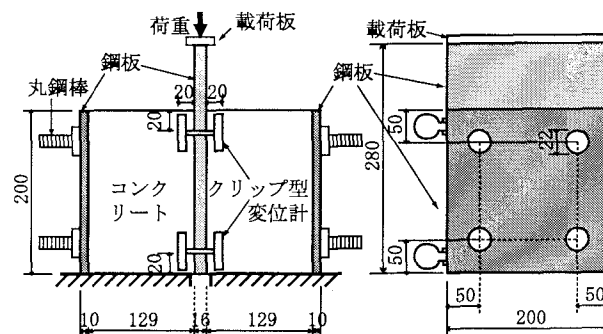


図-1 内部支圧試験体 (単位 mm)

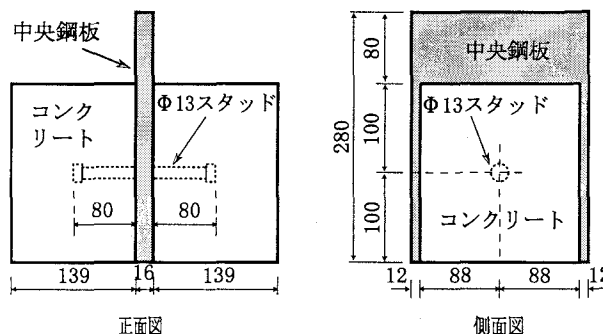


図-2 外部支圧試験体 (単位 mm)

図-1に示すように試験体を載荷試験機のベッドに設置し、中央鋼板上部より載荷板を介して荷重を載荷した。そして、鋼とコンクリート間の鉛直方向相対ずれが、クラフトテープを貼付していないもので1mm程度、クラフトテープを貼付したものは2mm程度認められるまで、荷重載荷を継続した。ただし、内部支圧試験体では、試験体に設けた穴と丸鋼棒の径差の範囲内で鉛直方向相対ずれを起こすことが可能である。

試験中の計測項目は、中央の鋼板への載荷荷重および図-1に示すように試験体下部より20mmと上部より20mmの位置に取り付けた8個のクリップ型変位計を用いて計測される、鋼板とコンクリートとの鉛直方向相対ずれとした。

2.2 外部支圧試験体

一方、図-2に示すように鋼板をコンクリートブロックで挟んだ同様の要素試験体を用い、試験体の外側に2枚の鋼板を配置し、両端にネジ切りした4本の丸鋼棒で締めることによって中央鋼板に支圧力を与えた。以下、このタイプの試験体を外部支圧試験体と呼ぶ。支圧力を与える際には、4本の丸鋼棒に同等の軸力を与えるためトルクレンチにより等しいトルクでネジを締め、図-3-aに示したロードセルによって支圧力を測定した。図-3-bに示すように試験体を載荷試験機のベッドに設置し、中央鋼板上部に荷重を載荷した。そして、鋼とコンクリートの間の鉛直方向相対ずれが10mm程

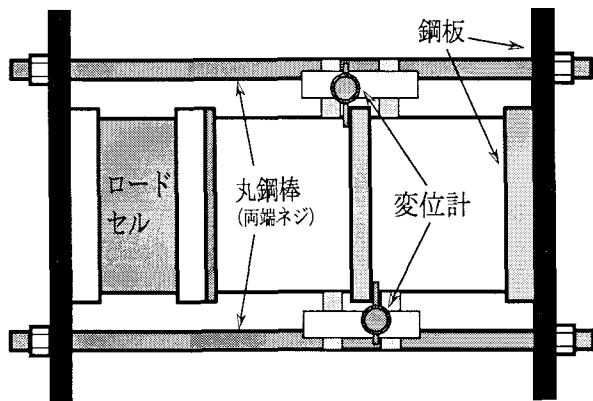


図-3-a 平面図

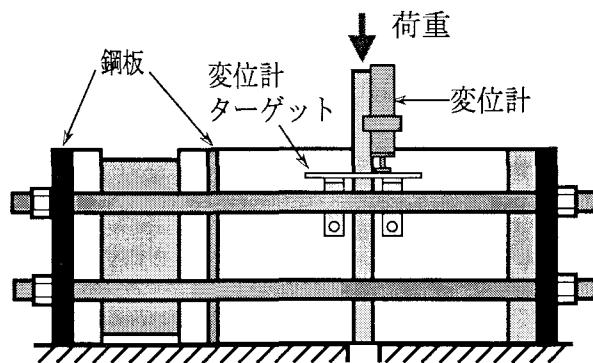


図-3-b 立面図

図-3 外部支圧試験体の荷重状況

度になるまで荷重荷重を継続した。

この試験では、平鋼板をコンクリートと直接接触させた試験体、両者の接触面に厚さ 1mm のテフロンシートを 2 枚挟んで摩擦の影響を極力小さくした試験体、さらにそれぞれの鋼板に軸径 13mm、高さ 80mm の頭付きスタッドを図-2 のように取り付けた試験体の 4 種類を用いた。なお、スタッドがなくテフロンシートを挿入した試験体では、4 通りの支圧力に対する試験を 1 つの試験体で実施した。その他については、それぞれ 2 体ずつ試験を行った。これらの試験体の種類、条件などを表-1 にまとめている。

試験中には、中央鋼板への載荷荷重および中央鋼板とコンクリートとの鉛直方向相対ずれを計測した。なお、相対ずれは、中央鋼板の上部より 40mm の位置に取り付けた 2 つの高感度変位計を用いて計測し、変位計のターゲットは、中央鋼板から水平方向に 20mm、コンクリートブロック上面から 80mm 下の位置に図-3-b のように設置した。

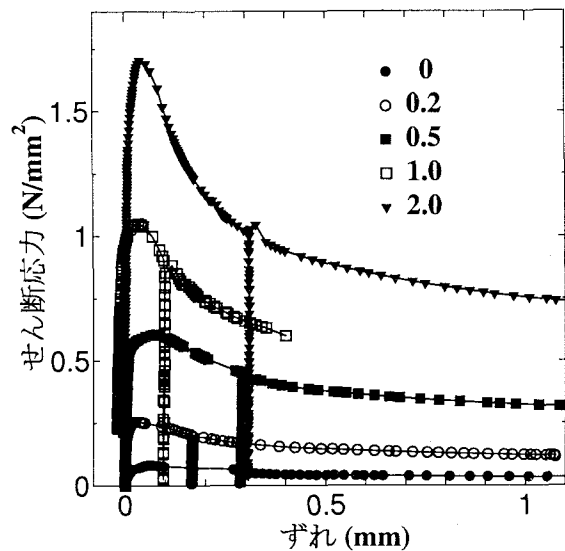


図-4-a クラフトテープなし (P)

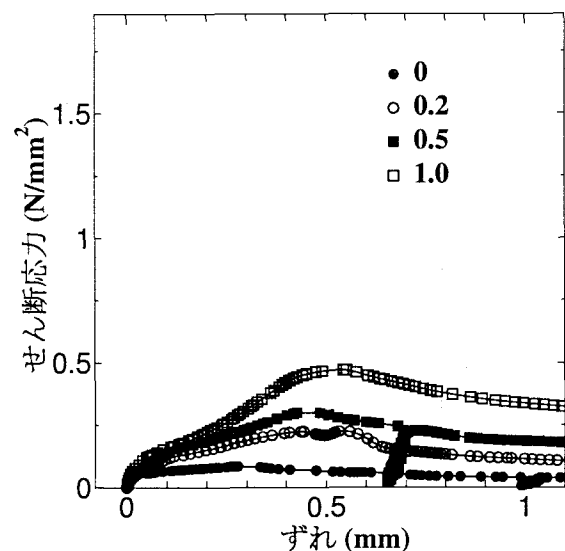


図-4-b クラフトテープあり (CP)

図-4 内部支圧試験体の荷重-ずれ関係

3. 試験結果および考察

3.1 荷重-ずれ関係

内部拘束試験体の支圧摩擦試験より得られた中央鋼板への載荷荷重と相対ずれの関係の例を図-4 に示す。縦軸は載荷荷重を鋼板とコンクリートの接触面積で除したせん断応力を、横軸は 8 個のクリップ型変位計を用いて計測した鋼板とコンクリートとの鉛直方向相対ずれの平均値を表し、また、図中の数字は支圧力の大きさを表している。クラフトテープを貼付しない場合 (P) には、図-4-a に示すように最大荷重（最大せん断応力）に達するまでのずれが非常に小さく、また、支圧力が大きいほど、最大荷重到達後、急激に荷重が低下していることがわかる。これに対して、クラフトテープを貼付した場合 (CP) には、図-4-b に示すように最

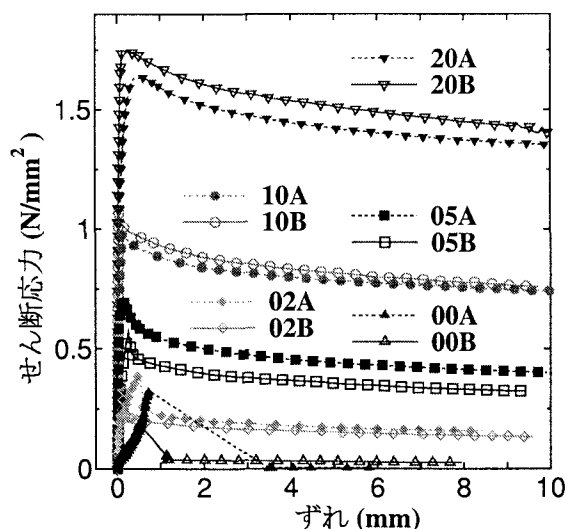


図-5-a スタッド・テフロンシートなし (P)

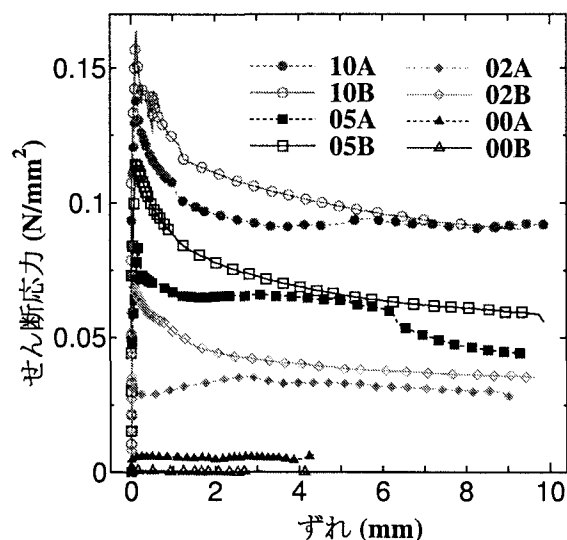


図-5-b テフロンシートあり (TP)

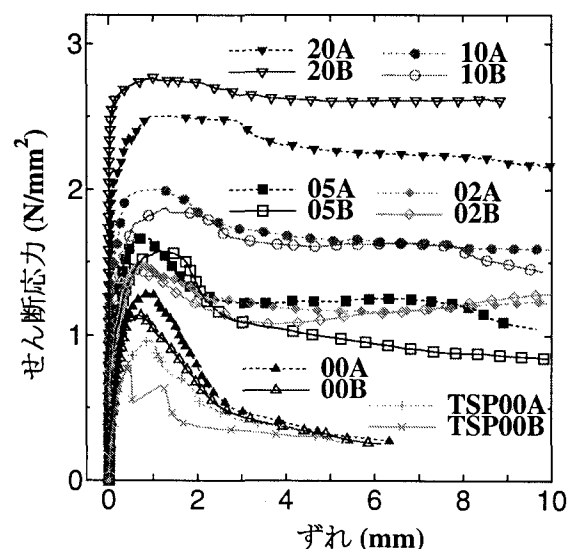


図-5-c スタッドあり (SP, TSP)

図-5 外部支圧試験体の荷重-ずれ関係

大荷重に達するまでのずれがクラフトテープのない場合よりも大きく、また、最大荷重到達後の荷重低下が緩やかであることがわかる。後者では、コンクリートと鋼板のずれに加えて、鋼板とクラフトテープの界面でもずれが生じると考えられ、その結果、最大荷重に達するまでの勾配が緩やかになっているものと考えられる。しかし、どちらの試験体とも、支圧力が大きいほど最大荷重（最大せん断応力）は大きく、また、最大荷重に達した後、ずれ大きくなるにつれて荷重は一定値に収束していく傾向が見られる。

一方、外部拘束試験体の支圧摩擦試験より得られた中央鋼板への載荷荷重と相対ずれの関係の例を図-5に示す。この場合も、縦軸は載荷荷重を鋼板とコンクリートの接触面積で除したせん断応力として表している。鋼板とコンクリートが直接接触する試験体 (P)、その間にテフロンシートを挿入した試験体 (TP) およびスタッドを有する試験体 (SP, TSP) の結果を図-5-a, 図-5-b, 図-5-c に示す。図中の数字は支圧力の大きさであり、2体実施した結果を A, B で表している。

スタッドがない場合 (図-5-a) と、スタッドがある場合 (図-5-c) を比較すると、前者の方が最大荷重時のずれが小さい。しかし、どちらの場合にも、支圧力が大きいほど最大荷重に達した後の荷重の減少が緩やかで、支圧力が小さいほど最大荷重に達した後荷重が大きく減少している。この理由は、支圧力が大きい場合には、最大荷重に達した後も鋼板とコンクリートの接触面において、摩擦によりある程度荷重が伝達されるためであると考えられる。しかし、この傾向は内部支圧試験体の場合と異なる。

一方、図-5-b に示すように鋼板とコンクリートの接触面にテフロンシートを挿入した試験体の荷重-相対ずれ関係においては、最大荷重までのずれは非常に小さく、また、支圧力が大きい場合のほうが最大荷重に達した後、荷重が急激に減少していることがわかる。しかし、図-5-a のテフロンシートを挿入していない試験体の結果に比較して、その最大荷重は非常に小さく、結果的に摩擦の影響が小さいと言える。

鋼板とコンクリートを直接接触させた内部拘束試験体と外部拘束試験体の結果 (図-4-a, 図-5-a) を比較すると、内部拘束試験体の場合の方が、最大荷重時のずれが幾分小さく、特に、支圧力が大きい場合には最大荷重到達後の荷重低下が急激に生じていることがわかる。この原因は、試験体の形状の差異、支圧力付加方法の差異によるものと考えられるが、明確な理由の解明は今後の課題である。

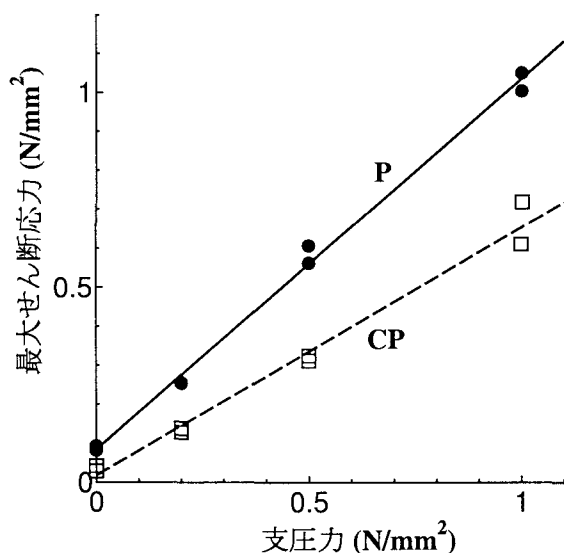


図-6 内部支圧試験体の最大せん断応力-支圧力関係

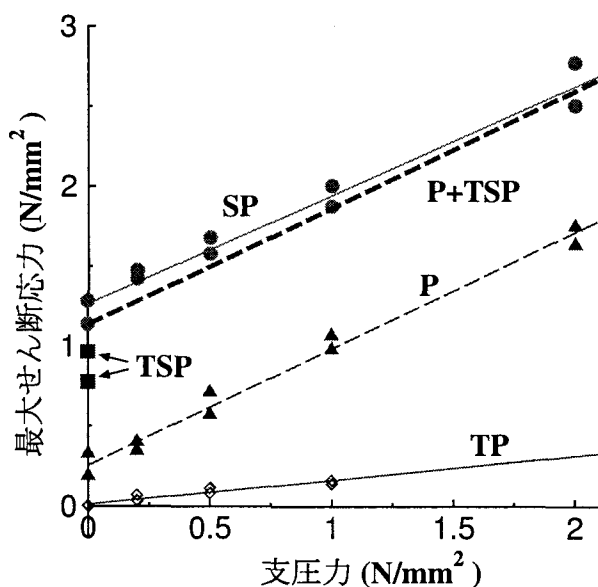


図-7 外部支圧試験体の最大せん断応力-支圧力関係

3.2 最大荷重-支圧力関係

前述の荷重-相対ずれ関係から求められる最大荷重（最大せん断応力）と支圧力の関係を、内部拘束試験体および外部拘束試験体について以下に示す。図の縦軸には最大せん断応力を取り、横軸には支圧力を取って表す。図-6が内部拘束試験体の関係（P, CP）、図-7が外部拘束試験体の関係（P, TP, SP, TSP）であり、図中にはそれぞれ対応する関係の最小2乗近似線も示している。これらの図から、各試験タイプの支圧力と最大せん断応力の間にはほぼ線形関係が成り立つことがわかる。

また、それぞれの最小2乗近似線から接触面の摩擦係数を算出すると、内部拘束試験体において、鋼板と

コンクリートを直接接触させた場合（P）および鋼板にクラフトテープを貼り付けた場合（CP）、0.95 および 0.40 となった。これに対して、外部拘束試験体において、鋼板とコンクリートを直接接触させた場合（P）、接触面にテフロンシートを挿入した場合（TP）および前者でスタッドを有する場合（SP）、摩擦係数はそれぞれ 0.73, 0.15, 0.68 となった。やはりテフロンシートを挿入した場合には、接触面の摩擦係数を小さくできている。これに対して、鋼板とコンクリートを直接接触させた場合には、外部拘束試験体で 0.73, 内部拘束試験体で 0.95 と非常に高い摩擦係数となっており、両者で値が大きく異なる。その理由の解明も今後の検討課題である。

ところで、外部拘束試験体において、鋼板とコンクリートを直接接触させた試験体の近似直線を、テフロンシートとスタッドを有する支圧力ゼロの試験体の最大せん断応力（約 0.88 N/mm^2 ）だけ上方に平行移動した線を、図-7に P+TSP として太い破線で示した。ここで、TP と TSP の支圧力 0.0 N/mm^2 の最大荷重を比較すると、前者は後者に比べて十分に小さいと言えるので、後者は鋼とコンクリートの接触面の摩擦を無視したスタッドのみによる最大せん断応力の値であると考えられる。その結果、P+TSP は細い実線で示す SP の最小2乗近似線と近いものになり、これら3つの試験体の最大荷重において、 $P+TSP=SP$ の関係が成り立っていることが確認できる。このことから本研究の範囲では摩擦作用のみが支圧力に比例すると言える。ただし、図-5に示すように、P と SP の荷重-ずれ関係においては最大荷重時のずれの大きさは異なっている。

4. おわりに

そこで本稿では、複合構造内の鋼とコンクリートとの接触面を模擬した2タイプの要素試験体を用い、支圧力、鋼とコンクリートの接触面の付着性状および機械作用（スタッド）の有無などをパラメータとして、鋼とコンクリートの接触面の付着作用を検討した。ここでは、鋼とコンクリートの接触面に垂直の支圧力を作用させた状態で、接触面に平行な応力伝達に着目して試験を行った。

本研究の範囲内で得られた結果を要約すると以下のようになる。

1. 支圧力を受ける鋼とコンクリートの接触面に平行なせん断応力とずれの関係は、接触面の付着性状により複雑に変化する。
2. 鋼とコンクリートの接触面に平行な最大せん断応力と支圧力の関係は、ほぼ線形関係を示す。
3. 摩擦作用のみあるいは機械的作用のみを有する試

験体の最大せん断応力の和で、両作用が存在する試験体の最大せん断応力をほぼ表現することができる。

4. ここで用いた支圧力の範囲では、支圧力は摩擦作用には影響を及ぼすが、機械的作用にはほとんど影響を及ぼさない。

ただし、鋼とコンクリートの接触面の付着作用を検討するためにここで実施した2タイプの要素試験体により得られるせん断応力-ずれ関係あるいは最大せん断応力-支圧力関係には種々の点から差異が認められた。この原因は、試験体の形状の差異、支圧力付加方法の差異によるものと考えられるが、明確な理由の解明は今後の課題と考えている。

なお、本研究の一部は、科学研究費補助金（平成 14

～15 年度基盤研究 (C)、課題番号 14550475）の補助を受けて実施している。

参考文献

- 1) 園田恵一郎, 鬼頭宏明, 中島一男: 突起付き鋼板の付着特性に関する実験的研究, 第 3 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.155-160, 1995.11.
- 2) 山田真幸, サトーン ペンボン, 三木千壽, 市川篤司, 入部孝夫: RC 床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1161-1168, 2001.3.
- 3) 本田紘美, 中島章典, 斉木功, 大江浩一: 鋼とコンクリートの接触面の付着性状, 第 29 回関東支部技術発表会講演概要集, pp.122-123, 2002.3.
- 4) 中島章典, 藤澤知樹, 斉木功, 大江浩一: 鋼・コンクリート接触面の付着に及ぼす支圧およびスタッドの影響, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, I-448, 2003.9.