

## 鋼コンクリート界面の付着強度評価法に関する一提案

Evaluation of Interface Bonding Strength between Steel and Concrete

斉木 功\*・菊地浩貴\*\*・山田真幸\*\*\*岩熊哲夫\*\*\*\*

Isao SAIKI, Hiroki KIKUCHI, Masaki YAMADA and Tetsuo IWAKUMA

\*博士 (工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

\*\*修士 (工) 株式会社 JFE エンジニアリング (〒100-0004 東京都千代田区大手町 2-6-2)

\*\*\*博士 (工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

\*\*\*\*PhD 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

For the best performance of hybrid structures, it is essential to combine different kinds of materials. Although bonding is one of the primitive mechanisms of the combination, the present design codes of steel-concrete hybrid structures consider only shear connectors for the combination. In order to make the design of hybrid structures more rational, it is of advantage to understand interface bonding and its strength. Therefore, an element test that can accurately evaluate bonding strength is developed so that the primitive mechanisms of combination are clarified and utilized for the design.

**Key Words :** *interface, steel and concrete hybrid structures, bonding strength, element test*

## 1. まえがき

複合構造は、2 種類以上の異なる材料を組み合わせることで優れた性能を発揮させる構造である。土木分野では主に鋼とコンクリートを組み合わせた複合構造が一般的である。これは、引張強度が高く変形性能に優れる鋼と安価で圧縮強度が高いコンクリートを組み合わせることによって、合理的で優れた構造を作ることができるためである。

複合構造が成立するための最も重要な前提条件は、異種材料間での一体化がなされていることである。鋼・コンクリート複合構造における鋼とコンクリートの一体化は、現行の設計指針<sup>1),2)</sup>では、ずれ止めによる機械的接合によって担保することとなっている。しかしながら、ずれ止め以外の異種材料界面においても、付着・摩擦・支圧といった一体化の原始的な作用が働いている。また、ずれ止めによる機械的接合も、微視的な視点で考えると、付着・摩擦・支圧といった原始的な作用の組み合わせによって成り立っていると言える。ここでの付着力とは物理吸着とも言われる分子間に作用する力である<sup>3)</sup>。

近年では、要求される経済性や耐久性・耐震性から、多くの形式の複合構造が考案され実用化されている。それらの中には、異種材料の結合部が非常に複雑で、一体化のために設けられるずれ止め作用する力が必ずしも解析的に明らかにできない構造物も含まれる。そのような場合、結合部の一体化を担保するために模型実験が行われたり、有限要素解析によってずれ止め作用する力を数値的に求める必要がある。計算機の能力が発展した現在では、特に後者の有限要素解析による性能照査に対

する期待が高まっているが、複合構造においては、異種材料間の界面に作用する付着力や摩擦力のモデル化が解析精度を高めるために必要になってきている。

また、近年では頭付きスタッド等のずれ止めの性能評価において、従来の押し抜き試験<sup>4)</sup>に加えて有限要素解析が用いられるようになってきた。この背景には、有限要素解析による新しい高性能なずれ止めの開発への期待があると考えられる。そのような場合、微視的な付着・摩擦に関する力学特性をモデル化する必要があるが、たとえば Lam et al.<sup>5)</sup>が行った頭付きスタッドの押し抜き試験体を再現した 3 次元有限要素解析においては、実験での観察結果に基づき、スタッド前面を剛結し背面を二重節点とすることによってスタッドとコンクリート間の応力伝達や剥離をアドホックに表現している。

一方で、非合成桁橋は、鋼桁とコンクリート床板は一体化していない前提で設計されるが、その合成桁と酷似した挙動から両者の間には付着力や摩擦力が作用していることは古くから知られている<sup>6),7)</sup>。このような場合、非合成連続桁の中間支点部においては、付着力や摩擦力を無視する設計が必ずしも安全側にはならない。

以上のことから、著者らは鋼・コンクリート間の付着強度や摩擦係数を把握することは、合理的な構造物の設計につながると考えた。

異種材料間の付着特性に関する研究としては、FRP とコンクリートに関するものが多く報告されており、一面せん断試験や二面せん断試験が行われている。たとえば Chajes et al.<sup>8)</sup>は一面せん断引き抜き試験を行い、付着長が一定の長さ以上になると付着強度は変わらないと述べている。また、Xiao et al.<sup>9)</sup>は二面せん断試験を行

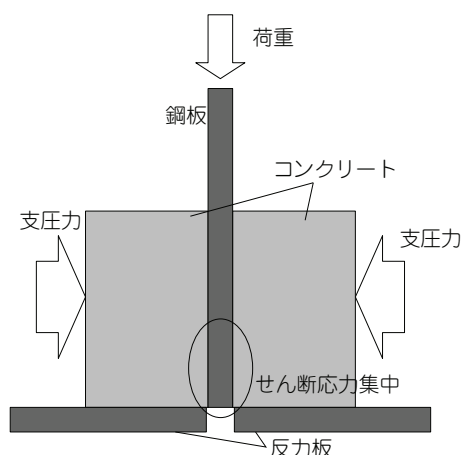


図-1 押し抜き試験の一例

い、効果的な付着長に関する考察を行っている。

一方、鋼とコンクリート間の付着特性に関してもいくつかの報告がなされている。園田ら<sup>10)</sup>は突起付きを含む3種類の鋼板を用いて引き抜きせん断試験を行った。突起の高さ、間隔、個数、支圧力、スタッドの有無をパラメータとして、これらのパラメータがせん断力伝達特性におよぼす影響を定量的に評価している。中島ら<sup>11),12)</sup>や猪股ら<sup>13)</sup>は、鋼コンクリートの付着・摩擦作用と機械的作用が鋼コンクリート間のせん断伝達に及ぼす影響を調べるために、図-1に示すような鋼とコンクリートの接触面を模擬した押し抜き試験体を作製し、静的載荷試験と繰り返し載荷による疲労試験を行った。著者らは、これらの押し抜き試験から、Lam et al.<sup>5)</sup>が行ったような有限要素解析で用いることのできる界面の力学挙動の数値モデルを提案している<sup>14)</sup>。

著者らは、多くの研究で採用されている一面せん断試験や二面せん断試験に類するせん断試験は、実構造物の巨視的な挙動を把握するためには問題がないが、本研究で着目しているような微視的な付着強度評価には問題があると考えている。それは、せん断試験体の異種材料界面端部にせん断応力が集中し、その結果、界面端部において付着破壊が生じやすくなる点である。このことは、著者が行った有限要素接触解析により明らかにされている<sup>14)</sup>。端部での応力集中は、構造的な要因で生じるものであり、それを含まないせん断試験は、界面端部を内在する構造物あるいは部材の付着力評価には適している。しかしながら、精緻な有限要素モデルに導入する微視的な付着力に関しては、そのような端部の影響は排除されるべきであり、端部の影響は解析モデルを通して再現されるべきであると考えている。

そこで、本研究では、従来のせん断試験が有していた応力集中の問題を回避できる小型かつ簡便なねじりせん断試験を提案することを目的とした。具体的には、これまで平面であった鋼・コンクリート界面を円周状とすることにより、界面端部をなくし、一様な剥離破壊を生じ

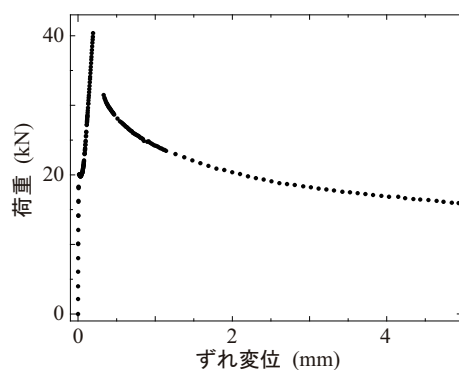


図-2 押し抜き試験による荷重-ずれ変位関係の一例

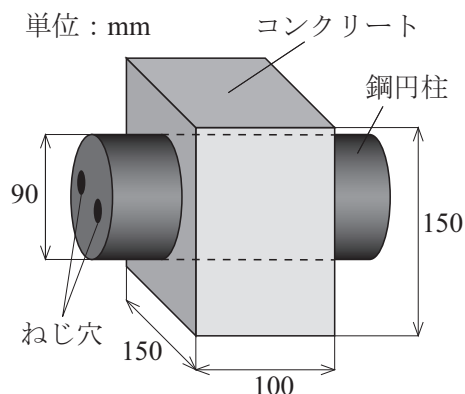


図-3 ねじりせん断試験体

させることにより、界面が本来有している付着強度の測定を可能とする。さらに、提案する試験により、異なる圧縮強度を有するコンクリート（モルタル）の付着強度を求め、圧縮強度と付着強度の関係を明らかにする。

## 2. 押し抜き試験の概要

前章で述べたように、付着強度を評価するために、押し抜き試験が行われてきた。押し抜き試験から得られる典型的な荷重-ずれ変位関係を図-2に示す。ここでのずれ変位とは、2面ある界面それぞれで紙面手前側と奥側で計測したずれ変位の平均である。図から、最大荷重に達する前に、ずれ変位が生じはじめていることがわかるが、これは、2面ある界面のうち片方に付着破壊が生じ始めるためと考えられる。また、図-1に示す反力板付近で生じる応力集中から、付着破壊が界面全体に同時期に起こらず、応力集中点から徐々に破壊が上方へ伝播するために、最大荷重直後に摩擦のみが働く状態にならず、徐々に荷重が低下する。このため、押し抜き試験結果から、界面が本来有している付着強度を推定することは困難である。

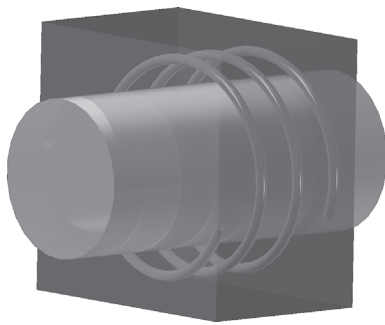


図-4 ねじりせん断試験体の配筋の様子

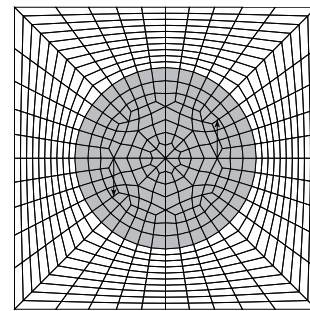


図-5 ねじりせん断試験体の有限要素モデル

### 3. 提案するねじりせん断試験

#### 3.1 ねじりせん断試験体

押し抜き試験においては、反力板付近の界面境界部でせん断応力の集中が問題となっていた。そこで、図-3に示すせん断方向に境界がない試験体を用いたねじりせん断試験を提案する。本試験体は、150mm 四方で厚さ100mmのコンクリートブロックと、その中心に埋め込まれた直径90mmの鋼円柱からなる。150mm 四方の型枠の中心に、後述する载荷アームを固定するためのねじ穴を左右両端に加工した鋼円柱を軸方向が鉛直方向となるように設置し、コンクリートの打設を行った。鋼円柱の表面は黒皮のままとし、プライマー等の塗装は行っていない。

界面の付着強度、摩擦力に粗骨材がおよぼす影響はないと考え、コンクリートにはモルタルを採用した。コンクリート強度が付着強度におよぼす影響を調べるために、圧縮強度の異なる3種類の配合のモルタルを用いて試験体を作製した。試験体モルタル部のひび割れを防止するために、直径6mmの鋼線を図-4に示すように直径120mmのらせん状に3周配筋した。

本試験体の界面近傍のせん断応力分布が、押し抜き試験と異なり一様になることを確認するために、図-5に示す簡単な有限要素モデルを用いた平面応力線形解析を行った。用いた要素はすべて4節点4辺形要素であり、総要素数は629、総節点数は625である。図中、中心部の灰色の部分が鋼であり、無色の部分がコンクリートである。鋼とコンクリートのYoung率比は8とし、鋼のPoisson比は0.3、コンクリートのPoisson比は0.25とした。コンクリートブロックの周囲の節点の変位を完全に拘束し、図中、矢印で示した2点にアームからねじを介して受ける力を偶力として作用させた。このときのコンクリート中の最大せん断応力分布を図-6に示す。線形解析であるので応力の大きさには意味がないが、分布をみると、界面付近の最大せん断応力はほぼ一様であり、応力集中はみられない。

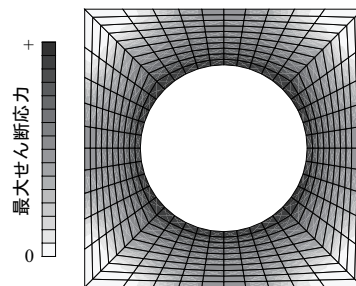


図-6 ねじりせん断試験体の最大せん断応力分布

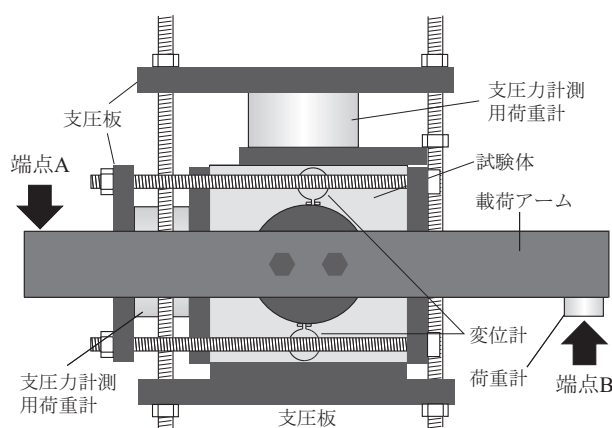


図-7 ねじりせん断試験

#### 3.2 試験方法

試験体が図-5に示す平面において等方圧縮状態であれば、鋼・コンクリート界面に垂直な支圧応力が作用すると考えられる。そこで、鋼・コンクリート界面周辺が等方圧縮状態になるように、図-7に示す支圧力計測用の荷重計により支圧力を計測しながら鉛直方向と水平方向に等しい大きさの支圧力を与えた。これらの支圧力を载荷する際には、鉛直方向と水平方向の支圧力の差が大きくならないように注意した。摩擦係数を測定するために、0.0MPaと0.25MPaと0.5MPaの3種類の支圧応力に対して試験を行った。

図-7の紙面手前側および奥側のそれぞれに、载荷アームを試験体中の鋼円柱に固定し、载荷アームの両端点に互いに逆向きの荷重を与えることにより载荷を行っ

表-1 モルタルの圧縮強度と支圧応力および試験体数

|      | 圧縮強度<br>$\sigma_c$ (MPa) | 支圧応力<br>(MPa) | 試験<br>体数 |
|------|--------------------------|---------------|----------|
| 配合 1 | 12.4                     | 0.00          | 3        |
|      |                          | 0.25          | 3        |
|      |                          | 0.50          | 2        |
| 配合 2 | 27.8                     | 0.00          | 4        |
|      |                          | 0.25          | 4        |
|      |                          | 0.50          | 4        |
| 配合 3 | 35.0                     | 0.00          | 3        |
|      |                          | 0.25          | 4        |
|      |                          | 0.50          | 4        |

た。ただし、付着破壊時に荷重が急激に減少するため、荷重は変位制御で行う必要がある。しかし、両端点を変位制御しつつ、等しい荷重を載荷することは現有の試験機では困難であったため、片方の端点 A には一定の荷重を載荷した上で、もう片方の端点 B を変位制御により載荷した。なお、端点 A に載荷する下向きの荷重は、すべての試験に対してほぼ 1kN とした。

モルタル強度および支圧応力をパラメータとして、計 31 体の試験体に対して、以上述べたねじりせん断試験を行った。各パラメータと試験体の数を表-1 に示す。

界面をはさんでの鋼・コンクリート間の相対変位をクリップ型変位計を用いて測定した。相対変位は、図-7 における鋼円柱の上側および下側それぞれ紙面手前側および奥側の計 4 箇所計測した。また 4 箇所の相対変位の平均値をずれ変位と定義した。試験中、端点 B の変位を漸増し、荷重・支圧力・相対変位は 4 秒間隔で測定・記録した。ここで、荷重は端点 A に載荷した下向きの荷重と端点 B に作用する上向きの荷重の合計である。荷重が最大値となった後に減少し、ずれ変位が 5mm 程度で荷重がほぼ一定になった時点で試験を終了した。

## 4. 試験結果と考察

### 4.1 試験結果

配合 1 の試験体の支圧応力 0.00MPa, 0.25MPa, 0.50MPa に対する荷重-ずれ変位関係を図-8 に示す。支圧応力 0.00MPa, 0.25MPa, 0.50MPa に対する試験はそれぞれ 3, 3, 2 体に対して行ったが、図には各支圧応力から 1 体分のみを示した。いずれの支圧応力に対しても、最大荷重時のずれ変位はほぼゼロであった。最大荷重後は、界面の付着破壊によって急激に荷重が低下した。このとき、前後する計測点でずれ変位も 0.1mm から 0.5mm 程度変化しているが、これは付着破壊に伴う除荷によってそれまでに蓄えられていた弾性変形が開放されるためであると考えられる。ずれ変位が 0.5mm 以

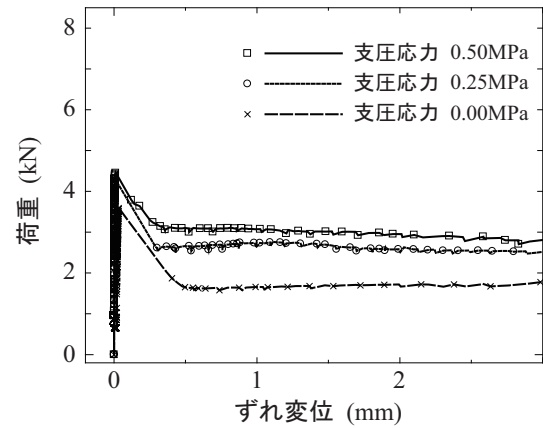


図-8 荷重-ずれ変位関係 (配合 1:  $\sigma_c = 12.4$  MPa)

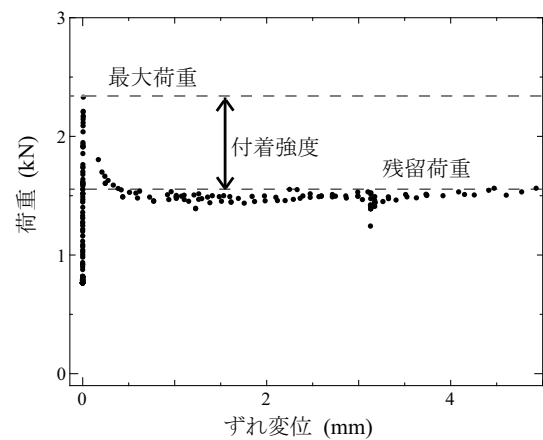


図-9 最大・残留荷重と付着強度の関係

降になると、荷重はほぼ一定になった。これは、付着破壊が 0.5mm 以下の小さなずれ変位で完了し、その後は摩擦力のみが界面に作用するためである。本試験では、図-2 に示す押し抜き試験に比較すると、付着破壊後に摩擦力のみが作用する状態に移行するまでのずれ変位が非常に小さいことから、付着破壊がほぼ同時期に生じていると考えられる。本論文では、ずれ変位が 2mm の点を摩擦力のみが作用する残留荷重と定義した。ただし、付着破壊後を細かくみると、静止摩擦力と動摩擦力の違いから、荷重の細かな上下動が観察された。そこで、ずれ変位が 2mm を越えた点の荷重の極大値を残留荷重と定義した。

最大荷重と残留荷重の差は付着の破壊によって生じたと考えた。最大荷重時の界面のせん断応力を最大せん断応力  $\tau_{\max}$ 、残留荷重時の界面のせん断応力を残留せん断応力  $\tau_{\text{res}}$  と定義すると

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}L}{rA}, \quad \tau_{\text{res}} = \frac{F_{\text{res}}L}{rA} \quad (1)$$

であり、それらの差から付着強度  $\tau_{\text{bond}}$  は

$$\tau_{\text{bond}} = \tau_{\max} - \tau_{\text{res}} \quad (2)$$



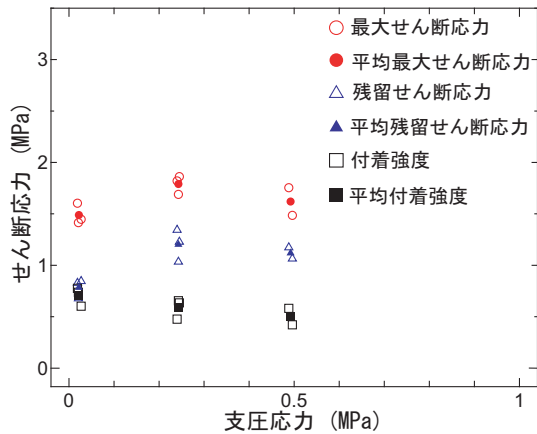


図-10 最大・残留せん断応力と付着強度 (配合1:  $\sigma_c = 12.4 \text{ MPa}$ )

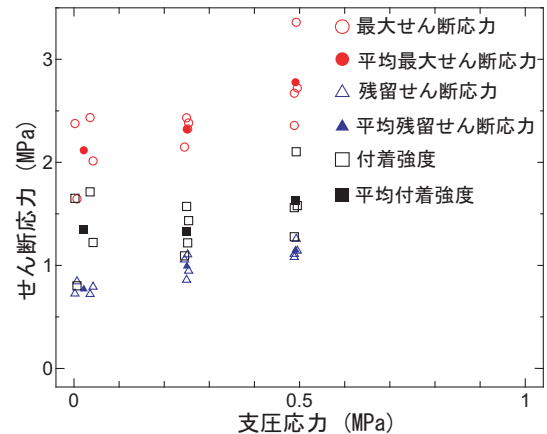


図-12 最大・残留せん断応力と付着強度 (配合2:  $\sigma_c = 27.8 \text{ MPa}$ )

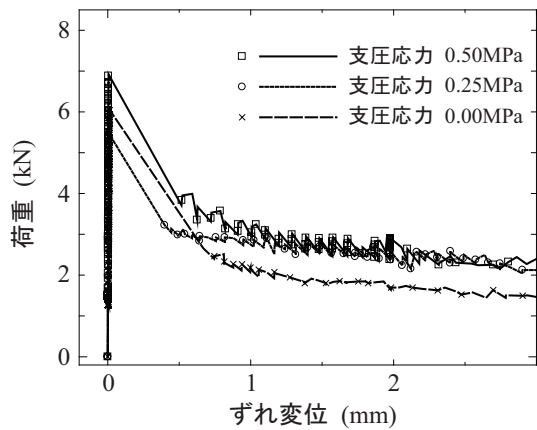


図-11 荷重-ずれ変位関係 (配合2:  $\sigma_c = 27.8 \text{ MPa}$ )

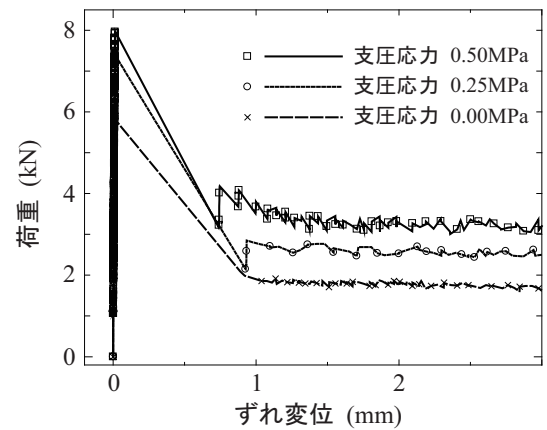


図-13 荷重-ずれ変位関係 (配合3:  $\sigma_c = 35.0 \text{ MPa}$ )

となる。ここで、 $F_{\max}$  は最大荷重、 $F_{\text{res}}$  は残留荷重、 $L$  は荷重アームの回転中心から荷重載荷点までの距離、 $r$  は鋼円柱半径、 $A$  は鋼・コンクリート界面の面積である。図-9には代表的な荷重-ずれ変位関係における最大荷重、残留荷重、付着強度の関係を図示した。

配合1の試験体計8体に対する最大せん断応力・残留せん断応力と付着強度の関係を図-10にまとめた。図には、それぞれの支圧応力における2ないし3体の結果の平均も示した。摩擦力は支圧力に比例すると考えられるため、支圧力の増加に伴い最大せん断力・残留せん断力ともに増加すると予想されたが、支圧応力0.5MPaの最大せん断応力はそのような予想からするとやや小さめであった。その影響もあり、支圧応力0.5MPaの付着強度はやや小さめであったが、支圧応力によらずほぼ一定の付着強度が得られた。

配合1のときと同様に、配合2の試験体の支圧応力0.00MPa、0.25MPa、0.50MPaに対する荷重-ずれ変位関係を1体分ずつ図-11に示す。いずれの支圧応力に対する結果も、配合1に比較すると最大荷重が大きくなっている。それに対し、残留荷重はあまり変化していな

い。

配合2の試験体計12体に対する最大せん断応力・残留せん断応力と付着強度の関係を図-12にまとめた。図には、それぞれの支圧応力における4体の結果の平均も示した。支圧力の増加に伴い最大せん断力・残留せん断力ともに増加した。これは、支圧力の増加にともなう摩擦力の増加によるものと考えられる。付着強度はほぼ一定だが、支圧応力0.50MPaのみ20%程度大きな付着強度が得られた。

配合3の試験体の支圧応力0.00MPa、0.25MPa、0.50MPaに対する荷重-ずれ変位関係を1体分ずつ図-13に示す。いずれの支圧応力に対する結果も、配合2に比べると最大荷重が大きくなっている。それに対し、配合1および2に比べると残留荷重はあまり変化していない。

配合3の試験体計11体に対する最大せん断応力・残留せん断応力と付着強度の関係を図-14にまとめた。図には、それぞれの支圧応力における3ないし4体の結果の平均も示した。最大せん断力・残留せん断力は、配合2と同様に支圧応力の増加とともに増加する傾向がみら

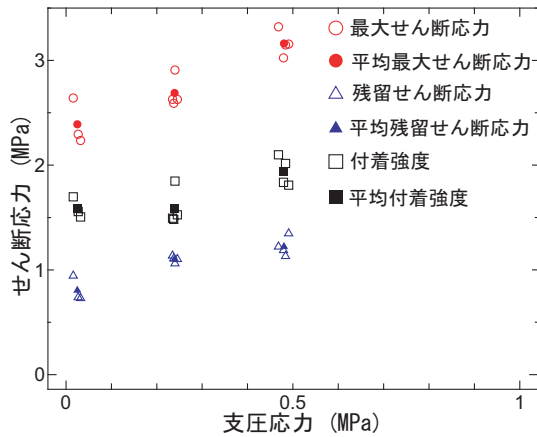


図-14 最大・残留せん断応力と付着強度 (配合3:  $\sigma_c = 35.0$  MPa)

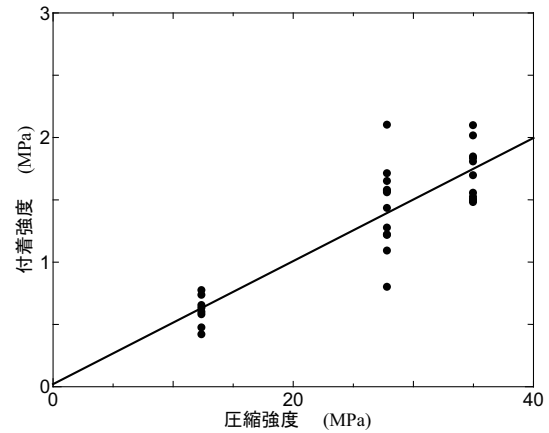


図-15 圧縮強度と付着強度の関係

表-2 実験により得られた付着強度および摩擦係数

| 圧縮強度<br>$\sigma_c$ (MPa) | 支圧応力<br>(MPa) | 試験<br>体数 | 付着強度<br>$\tau$ (MPa) | $\tau/\sigma_c$ | 摩擦<br>係数 |
|--------------------------|---------------|----------|----------------------|-----------------|----------|
| 12.4                     | 0.00          | 3        | 0.706                | 0.057           | 0.77     |
|                          | 0.25          | 3        | 0.589                | 0.048           |          |
|                          | 0.50          | 2        | 0.502                | 0.040           |          |
| 27.8                     | 0.00          | 4        | 1.348                | 0.048           | 0.88     |
|                          | 0.25          | 4        | 1.330                | 0.048           |          |
|                          | 0.50          | 4        | 1.631                | 0.059           |          |
| 35.0                     | 0.00          | 3        | 1.587                | 0.045           | 0.80     |
|                          | 0.25          | 4        | 1.587                | 0.045           |          |
|                          | 0.50          | 4        | 1.940                | 0.055           |          |

れた。これは、支圧力の増加にともなう摩擦力の増加によるものと考えられる。付着強度の傾向も配合2と同様、ほぼ一定であった。

配合1, 2, 3に対する試験結果から、式(2)より求めた付着強度を表-2にまとめる。表中の付着強度は同じパラメータの複数の試験体に対する平均である。また、表には残留せん断応力の支圧応力に対する勾配から求めた摩擦係数も含めた。

#### 4.2 圧縮強度と付着強度の関係

表-2より、モルタルの圧縮強度と付着強度の関係を図-15に示す。図にはすべての試験体に対する付着強度が含まれ、それらの最小二乗近似直線も示した。最小二乗近似線の傾きは0.049、切片は0.021MPa、相関係数は0.87であった。最小二乗近似線の傾きより、付着強度はモルタルの圧縮強度の1/20程度であることがわかる。

表-3 既往の研究との比較

| 試験<br>方法          | 圧縮<br>強度<br>$\sigma_c$<br>(MPa) | 支圧<br>応力<br>(MPa) | 付着<br>強度<br>$\tau$<br>(MPa) | $\tau/\sigma_c$ |
|-------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|
| 押抜 <sup>11)</sup> | 33.1                            | 0.4               | 0.259                       | 0.008           |
| 押抜 <sup>12)</sup> | 30.3                            | 0.4               | 0.350                       | 0.012           |
| 押抜 <sup>13)</sup> | 36.5                            | 0.4               | 0.455                       | 0.012           |

#### 4.3 既往の研究との比較

中島ら<sup>11),12)</sup>、猪股ら<sup>13)</sup>により得られた付着強度を表-3に示す。表面処理など実験の条件が異なるので単純に比較することは難しい。しかし、中島ら<sup>11),12)</sup>、猪股ら<sup>13)</sup>の押し抜き試験とほぼ同程度の圧縮強度である配合3 (圧縮強度35.0MPa)の付着強度は、既往の研究で得られた付着強度と比較して3～6倍程度大きいことがわかる。付着強度 $\tau$ と圧縮強度 $\sigma_c$ の比 $\tau/\sigma_c$ で比較すると、本研究で得られた $\tau/\sigma_c$ は0.049であったのに対して、既往の研究で行われた押し抜き試験で得られた $\tau/\sigma_c$ は表-3で示すように0.007～0.012であった。 $\tau/\sigma_c$ においても、本研究の結果は既往の研究の結果の4～7倍程度の大きさであった。

以上から、ねじりせん断試験では、押し抜き試験のように界面に応力集中が生じないため、界面が本来有している付着強度が得られたと考えられる。

#### 5. おわりに

従来行われてきたせん断試験において避けることのできなかった界面端部で生じる応力集中を回避するためのねじりせん断試験を提案した。さらに、提案したねじりせん断試験により、鋼・コンクリート界面の付着強度を評価した。本試験により、界面端部の応力集中が回避され、既往の研究より大きい、界面が本来有していると

思われる付着強度が得られた。また、コンクリートの圧縮強度を 12.4MPa から 35.0MPa に変化させることによって、圧縮強度と付着強度の関係を明らかにした。

#### 謝辞

本研究は科学研究費補助金（平成 20 年度～平成 22 年度，若手研究(B)，課題番号 20760296）の補助を受けて実施したことを付記し，関係各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 複合構造委員会複合構造標準示方書小委員会：複合構造標準示方書，(社) 土木学会，2009.
- 2) 鋼構造委員会鋼・合成構造標準示方書小委員会：鋼・合成構造標準示方書，総則編・構造計画編・設計編，(社) 土木学会，2007.
- 3) 山本雄二，兼田禎宏：トライボロジー，理工学社，1998.
- 4) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状，JSSC テクニカルレポート，No.35，1996.
- 5) Lam, D. and El-Lobody, E.: Behavior of headed stud shear connectors in composite beam, *ASCE J. Struct. Engrg.*, Vol.131, pp.96-107, 2005.
- 6) 三木千壽，山田真幸，長江進，西浩嗣：既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価，土木学会論文集，No.647/I-51, pp.281-294, 2000.
- 7) 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，土木学会構造工学論文集，Vol.47A, pp.1161-1168, 2001.
- 8) Chajes, M. J., Finch, W. W., Januszka, T. F. and Thomson, T. A.: Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol.93, pp.208-217, 1996
- 9) Xiao, J., Li, J. and Zha, Q.: Experimental study on bond behavior between FRP and concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.18, pp.745-752, 2004
- 10) 園田恵一郎，鬼頭宏明，中島一男，上中宏二郎：突起付き鋼板のせん断伝達特性に関する系統的研究，土木学会論文集，No.598/I-44, pp.183-202, 1998.
- 11) 中島章典，西村美也子，斉木 功，大江浩一：鋼・コンクリート接触面の支圧摩擦性状に及ぼす支圧負荷方法の影響，日本鋼構造協会鋼構造論文集，Vol.12, No.45, pp.185-192, 2005.
- 12) 中島章典，猪股勇希，斎川幾美，大江浩一：付着，機械的作用を有する鋼・コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討，土木学会論文集 A, Vol.63, pp.758-767, 2007.
- 13) 猪股勇希，中島章典，斉木 功，大江浩一：支圧力作用下における鋼・コンクリート接触面の静的・疲労付着特性，土木学会構造工学論文集，Vol.52A, pp.1083-1090, 2006.
- 14) 斉木 功，田中 光，戸塚 祐，中島章典，岩熊哲夫：2 体間ポテンシャルを用いた鋼コンクリート界面の一数值モデル，土木学会応用力学論文集，Vol.12, pp.281-288, 2009.

(2010 年 3 月 9 日 受付)