

# 鋼・コンクリート界面の付着および摩擦の評価

Evaluation of bonding and friction at the steel-concrete interface

戸塚 祐\*  
Yu TOZUKA

\*構造強度学研究室 (指導教員: 斉木功 助手)

It is important to clarify mechanical characteristics of interface between steel and concrete for rational design of their hybrid structure. In order to measure bond and friction acting on the interface, several element tests have been conducted. However, a difficulty to realize uniform shear stress distribution has been pointed out. In this context, we propose several element tests to accomplish uniform shear stress distribution with the help of finite element analysis.

**Key Words :** steel-concrete hybrid structure, bonding, friction, slip

## 1. まえがき

現在、鋼とコンクリートとを組み合わせた複合構造は、様々な構造物に用いられている。鋼・コンクリート界面には付着が存在し、これを介した力の伝達が行われているが、設計においては付着を考慮していない。しかし、例えば非合成桁であっても実際には付着が存在し合成挙動を示す<sup>1)</sup>ことが指摘されている。また、例えば連続桁では負の曲げモーメントが発生するため、付着を考えない設計が必ずしも安全側であると言えない。そのため、界面の付着特性を明らかにする必要がある。

中島ら<sup>2)</sup>は、コンクリートで鋼板を挟んだ試験体を用いて押し抜き試験を行い、界面の付着および摩擦特性を検討した。それに対し赤松ら<sup>3)</sup>は、以上のような押し抜き試験では、鋼・コンクリート界面に発生するせん断応力が一様にならず、付着が端部など応力集中が起きる箇所から徐々に剥がれるため、界面の付着を正確に評価するのが困難であると指摘している。そこで、界面に発生するせん断力が一様になるような試験体として、コンクリートに対して傾きを持つ鋼板を、両側からコンクリート挟んだ試験体を提案し、従来の押し抜き試験との比較を行った。しかし、側面に支圧を与えた結果、荷重の増加により支圧力が急激に増加し、せん断荷重の把握が困難となったため、支圧方法の検討の余地が残った。以上を踏まえ、本研究では従来の問題を改良した要素試験を提案し、界面の付着・摩擦特性の評価を試みる。

## 2. 実験概要

### (1) 試験体の設定

図-1に示した押し抜き試験体(以後、Aタイプと呼ぶ)は、文献<sup>2)</sup>で提案されたものである。しかし、この試験体では反力板付近にせん断応力が集中し、反力板付近

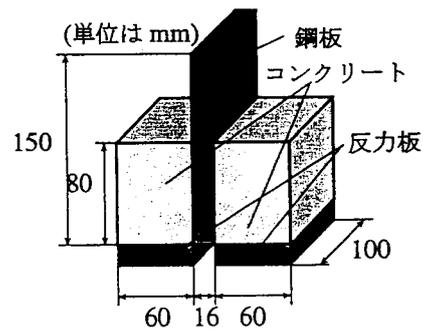


図-1 A: 押し抜き

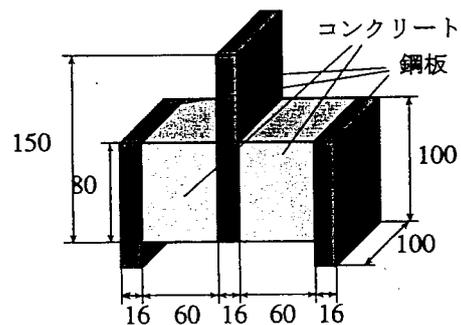


図-2 B: 押し抜き(改良)

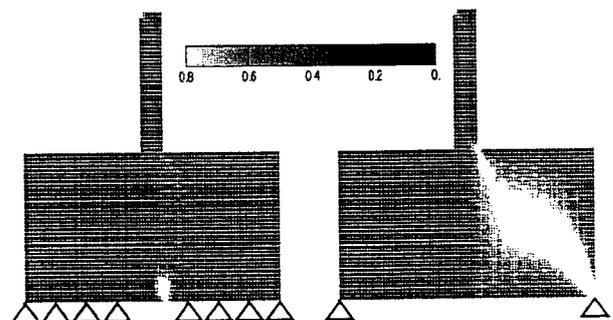


図-3 せん断応力分布

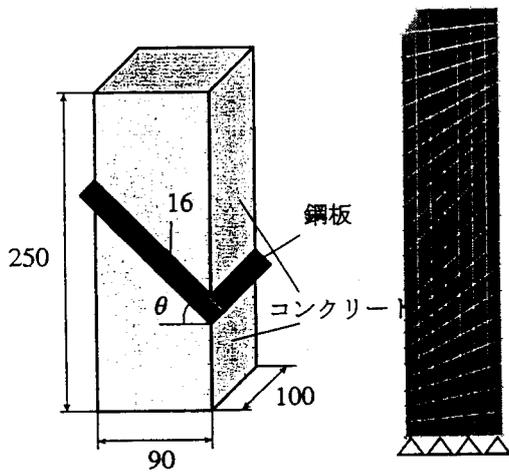


図-4 C: 圧縮せん断

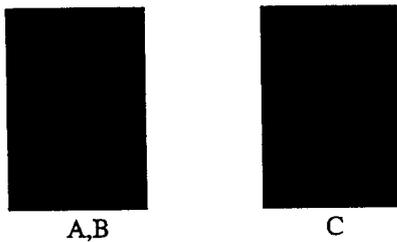


図-5 ずれ止め

から剥離が徐々に発生するため、付着力が小さく算出されると考えられる。そこで、図-2に示したように、コンクリートの両端に鋼板を取り付け、界面から離れた点にせん断力として反力を与えることにより、界面端部の応力集中を少なくする試験体を提案した(以後、Bタイプとする)。AおよびBタイプ試験体のせん断応力分布を図-3に示す。この値は、下記のように無次元化した値である。

$$\frac{\text{せん断応力(N/mm}^2\text{)} \times \text{面積(mm}^2\text{)}}{\text{載荷荷重(N)}} \quad (1)$$

左側はAタイプ試験体であり、反力板があるためコンクリート底部全体が拘束され、界面端部に応力集中が生じている。一方右側はBタイプ試験体であり、コンクリートの両端に取り付けた鋼板の場所のみが拘束され、界面のせん断応力はほぼ一様に分布している。しかし、Bタイプの試験体では、載荷により曲げ応力が作用し界面の上部が圧縮力を受ける。そこで、最大荷重時に支圧分布が一様になるように界面中央より16mm下に支圧力を作用させた。ただし、比較のために界面中央に支圧力を与えた試験も行った。界面中央に力を与えた試験体をB1タイプ、界面下方に力を与えた試験体をB2タイプと呼ぶ。次に、コンクリート中に鋼板を斜めに固定することにより界面のせん断応力分布が一様になるよう

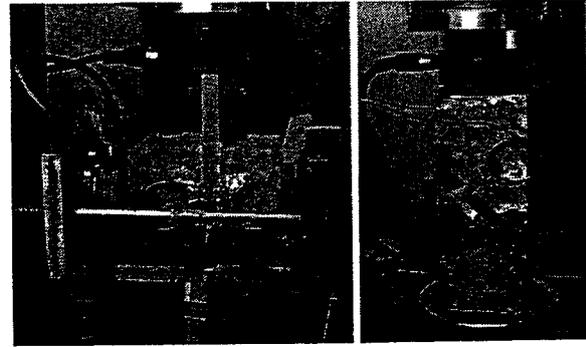


写真-1 試験状況

に文献<sup>3)</sup>で提案されている試験体を改良した試験体(以後、Cタイプと呼ぶ)を図-4に示す。図の右側に示したせん断応力分布より、界面のせん断応力はほぼ一様に分布していることがわかる。これらBおよびCタイプの試験体は、Aより付着力が大きくなることが予測される。Cタイプの試験体については、鋼板の角度が45°と60°の2種類を用いる。前者をC45タイプ、後者をC60タイプと呼ぶ。また、載荷前に剥離するのを防ぐため、図-5のように全ての試験体の鋼板両面において、界面の4隅に直径12mm、深さ4mmの円形の溝(以下、ずれ止めと呼ぶ)を設けた。

## (2) 実験方法

写真-1に示すように、油圧試験機を用いて変位制御で載荷を行い、一定の時間間隔ごとに荷重およびずれ変位を測定した。ずれ変位は、予め試験体に取り付けた治具にクリップ型変位計を設置して測定した。AおよびBタイプでは、試験体を二枚の鋼板で挟みボルトにより1N/mm<sup>2</sup>の支圧力を与えたが、Cタイプの試験体では、荷重の法線方向成分が支圧力となるため支圧は与えなかった。

## (3) 付着と摩擦の計算

AおよびBタイプ試験体では、摩擦は支圧の分布に依存しないという考えに基づけば、付着応力 $\sigma_b$ および摩擦係数 $\mu$ は、

$$\sigma_b = \frac{F_{\max} - F_{\text{rem}} - S}{A_{\text{ab}}}, \quad \mu = \frac{F_{\text{rem}}}{B \times 2} \quad (2)$$

により求められる。ここで、 $\sigma_b$ は付着応力、 $F_{\max}$ は最大荷重、 $F_{\text{rem}}$ は残留荷重、 $S$ はずれ止めのせん断耐力、 $A_{\text{ab}}$ は接触面積、 $\mu$ は摩擦係数、 $B$ は支圧荷重である。ただし、残留荷重 $F_{\text{rem}}$ はずれ変位が3.9~4.0mmの間の荷重の極大値であると定義する。また、ずれ止めのせん断耐力はコンクリートのせん断強度とずれ止めのコンクリートの断面積との積であると考え、コンクリートのせん断強度は文献によれば、圧縮強度の $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{6}$

あるいは $\frac{1}{10}$ と報告されている。Cタイプについては、45°と60°の最大荷重時における界面接線方向の力の釣合いより、付着応力 $\sigma_b$ と摩擦係数 $\mu$ の関係は、

$$F \times \sin \theta = \mu \times F \times \cos \theta + \sigma_b \times A + S \quad (3)$$

と表される。ここで、 $F$ は最大荷重、 $\mu$ は摩擦係数、 $\sigma_b$ は付着応力、 $A$ は接触面積、 $S$ はずれ止めのせん断荷重、そして $\theta$ は鋼板と試験体底面のなす角である。鋼板の傾きは2種類あるため、それぞれの最大荷重および接触面積を式(3)に代入すると2つの方程式が成り立ち、付着応力 $\sigma_b$ と摩擦係数 $\mu$ を求めることができる。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) せん断力—ずれ変位関係

試験体のタイプ毎に代表的な荷重変位関係を図-6, 7に示した。図の一本の線は一つの試験体の結果を表しており、ずれ変位はAおよびBタイプでは4つ、Cタイプでは2つの変位計の平均値である。C45タイプのみ最大荷重に大きなばらつきが見られたが、極端に大きくなっているものについては、実験後の観察により粗骨材など何らかの引っかかりが生じたものと考えられるため、付着力を算定する際には除外した。図-6より、AタイプとBタイプで概形は似ていることがわかる。ただし、Bタイプ試験体は残留荷重付近で荷重が離散的に変化している。これは、すべりの発生に伴い界面の状態が静摩擦から動摩擦へ変化するためであると考えられる。また、Cタイプ試験体については、C60がピーク後に急激に荷重が減少するのに対して、C45はピーク近くで傾きが変わり、ピークまで緩やかに増加する。これは、付着剥離の後コンクリートのせん断破壊が起こったためであると思われる。いずれにしても、付着力および摩擦係数は最大荷重にのみ依存する。

#### (2) 付着応力

実験結果から求めたタイプごとの付着力および摩擦係数を表-1に示した。この付着力は、コンクリートのせん断強度が圧縮強度の $\frac{1}{10}$ であるとした場合の値である。先に述べたように、付着力はずれ止めの抵抗力に依存する。さらに、写真-2に見られるように、Aタイプではずれ止めがせん断破壊するが、Bタイプでは意図しない形態で破壊し、その分の誤差が含まれることも改善すべきことであるこれについて、コンクリートのせん断強度と圧縮強度の比と付着応力の関係を図-8に示す。図に示したとおり、ずれ止めのは付着力に対して線形に影響する。さらに、その傾きは接触面積によるため、AおよびBタイプでは同じ傾きになる。コンクリートのせん断強度によって付着力の絶対量は変化するが、相対的には、BとCタイプの付着力が常にAタイプより大きく

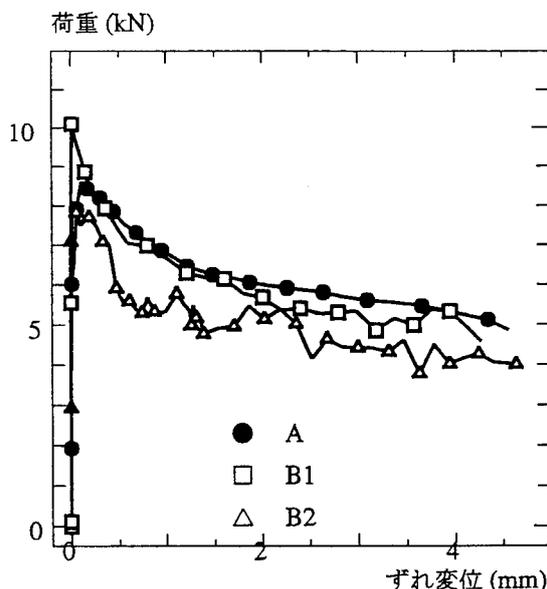


図-6 荷重—ずれ変位関係

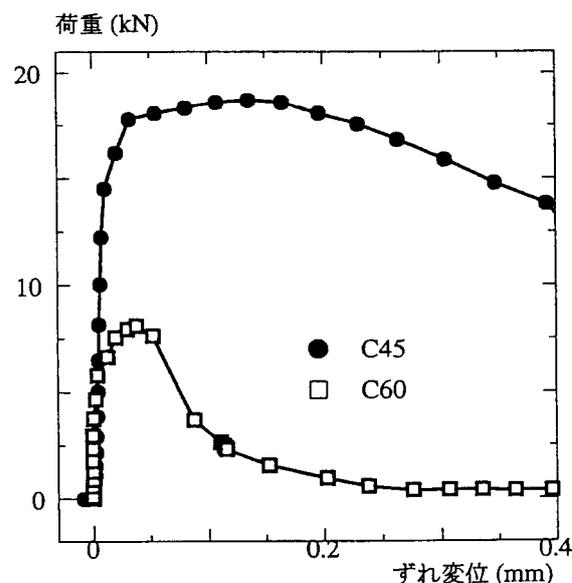


図-7 荷重—ずれ変位関係

なることが分かる。ここで、既往の実験に注目すると、中島ら<sup>2)</sup>の押し抜き試験では、本実験と同じ $1\text{N/mm}^2$ の支圧条件下で約 $0.53\text{N/mm}^2$ 、という付着力が報告されており、本研究で求めた付着力はそれと比べると小さい。自然付着によるばらつきも考えられるが、原因の特定には至っていない。Bタイプの支圧位置による比較では、B1の付着応力はB2より大きくなった。B2タイプでは、最大荷重時に発生する曲げモーメントを打ち消すことを意図したが、載荷前の状態において、界面下方の応力集中や部分的な剥離が発生し、その結果中央を支圧したタイプより付着力が小さくなったと考えられる。しかし、支圧を下方に偏心させて作用させたほうが最大荷重時の応力集中を緩和できるのも事実であり、例えば載

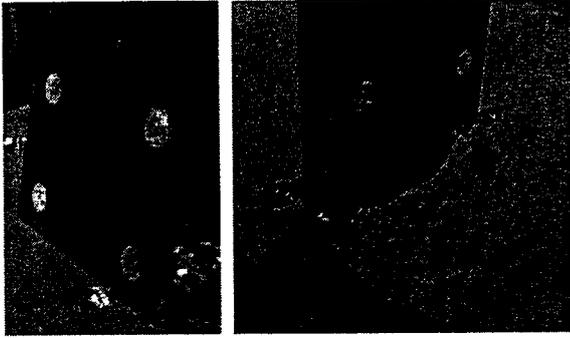


写真-2 Aタイプ(左)とBタイプ(B2)の破壊後の界面の様子

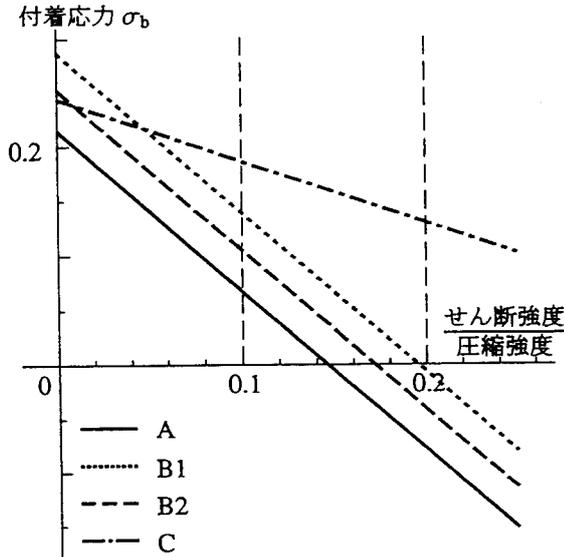


図-8 ずれ止めの影響

表-1 付着力および摩擦係数

試験体タイプ	付着応力 (N/mm <sup>2</sup> )	摩擦係数
A	0.068	0.35
B1	0.140	0.30
B2	0.106	0.26
C	0.187	0.72

荷開始時と最大荷重時の支圧位置を変更できる支圧方法など、B2タイプを改良する余地はあると考える。

### (3) 摩擦係数

摩擦係数に関しては、AとBタイプではBタイプがやや小さくなった。この理由として、写真-2に示したような予期せぬ形態の破壊に伴い界面の面積が減少し、それにより計算誤差が生じたことが考えられる。また、CタイプではAタイプの2倍以上の値となった。Cタイプの摩擦係数の計算過程において、先に述べたずれ止めの影響もほとんどなく、これだけ大きな違いが出たの

は別の理由によると思われる。既往の実験に注目すると、中島ら<sup>2)</sup>の押し抜き試験で約0.3、赤松ら<sup>3)</sup>の押し抜き試験では0.44という値が報告されており、これは本研究で行ったAおよびBタイプ試験体の結果と近い値となっている。

## 4. まとめ

本研究では、複合構造の鋼・コンクリート界面の力学的特性について実験による検討を行った。実験では、従来型の押し抜き試験体に加え、数値解析結果から界面の応力集中を緩和した押し抜き試験体を提案し、さらに押し抜きとは異なる圧縮せん断試験体の改良を行った。せん断力-ずれ変位関係から付着応力および摩擦係数を算出し、試験体のタイプごとに比較した。また既往の実験との比較も行い、本研究における実験の妥当性を検討し、以下の結論を得た。

- 新たに提案した押し抜き試験体および改良した圧縮せん断試験体において、従来型の押し抜き試験体より大きな付着力を得た。これは、界面の応力集中を緩和しより一様な応力状態にした結果であると考えられる。
- 既往の実験との比較による大きな違いとして、本研究の付着応力が小さくなったこと、そしてCタイプの摩擦係数が大きくなったことが挙げられる。
- Bタイプ試験体の支圧位置による比較では、支圧を下方に偏心させて作用させたほうが付着応力が小さくなったが、それについてはB2タイプを改良する余地があるとする。

今後の課題として考えられることは、本実験では鋼板に設けたずれ止めの影響を定量的に把握できなかったことから、ずれ止めの形状や数を変化させたり、あるいは付着の無い試験体を用いてずれ止めの影響のみを検討するといった試みが必要である。また、付着力の絶対量が既往の研究に比べてとても小さいこと、そしてCタイプの摩擦係数が大きくなったことについても検討したい。

### 参考文献

- 1) 山田真幸, サトーン ペンボン, 三木千尋, 市川篤志, 入部幸夫: 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
- 2) 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荷重方法の影響, 鋼構造論文集, Vol.12, No.45, pp.185-192, 2005.3
- 3) 赤松篤, 斉木功, 山田真幸, 岩熊哲夫: 鋼・コンクリート界面のせん断特性に関する実験的検討, 第31回東北支部技術研究発表会講演概要集, 2006.3.

(2007年2月6日提出)